



HAL
open science

Évolution historique et épistémologique de l'étude du mouvement. Exemples de quelques filiations théoriques et pratiques de l'animal à l'homme, vers la performance sportive

Philippe Campillo

► To cite this version:

Philippe Campillo. Évolution historique et épistémologique de l'étude du mouvement. Exemples de quelques filiations théoriques et pratiques de l'animal à l'homme, vers la performance sportive. Sciences du Vivant [q-bio]. UFR Université de Rouen. STAPS Rouen., 2018. tel-04443834

HAL Id: tel-04443834

<https://hal.univ-lille.fr/tel-04443834v1>

Submitted on 7 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à Diriger les Recherches (HDR)

Spécialité : STAPS

UFR STAPS ROUEN

Centre d'Études des Transformations des Activités Physiques et Sportives
(CETAPS)

Évolution historique et épistémologique de l'étude du mouvement

Exemples de quelques filiations théoriques et pratiques de l'animal à l'homme, vers la performance sportive

Présentée et soutenue par

M. Philippe CAMPILLO

**Diplôme soutenu publiquement le 5 octobre 2018
devant le jury composé de**

M. Bernard ANDRIEU	Professeur, Université Paris Descartes	Rapporteur
M. Luc ROBÈNE	Professeur, Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Didier DELIGNIÈRES	Professeur, Université de Montpellier	Rapporteur
M. Patrick PELAYO	Professeur, Université de Lille	Examineur
M. Didier CHOLLET	Professeur, Université de Rouen	Examineur
M. Olivier SIROST	Professeur, Université de Rouen	Garant

Habilitation à Diriger les Recherches (HDR)

Spécialité : STAPS

UFR STAPS ROUEN

Centre d'Études des Transformations des Activités Physiques et Sportives
(CETAPS)

Évolution historique et épistémologique de l'étude du mouvement

Exemples de quelques filiations théoriques et pratiques de l'animal à l'homme, vers la performance sportive

Présentée et soutenue par

M. Philippe CAMPILLO

**Diplôme soutenu publiquement le 5 octobre 2018
devant le jury composé de**

M. Bernard ANDRIEU	Professeur, Université Paris Descartes	Rapporteur
M. Luc ROBÈNE	Professeur, Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Didier DELIGNIÈRES	Professeur, Université de Montpellier	Rapporteur
M. Patrick PELAYO	Professeur, Université de Lille	Examineur
M. Didier CHOLLET	Professeur, Université de Rouen	Examineur
M. Olivier SIROST	Professeur, Université de Rouen	Garant

Remerciements

J'évoque toute ma gratitude à ceux qui d'une façon directe ou indirecte, ont contribué par les discussions et les lectures à l'accomplissement de cette synthèse. Ceux que l'on croise dans la vie de tous les jours, en chair et en os, mais aussi les autres, éloignés par la durée historique dont les écrits donnent accès à la culture, à l'ouverture d'esprit, aux naissances d'idées, bref à l'échange et à la communication dont nos sens nous orientent. Merci aux collègues et amis, scientifiques, vulgarisateurs, romanciers, bâtisseurs ; le progrès technologique est dans leurs créativité et leurs inventivités. Merci aux membres du jury de ce mémoire et de sa soutenance.

À tous les oubliés de l'histoire, des sciences et de l'épistémologie, qu'on lit sans les citer, mais qui souvent sans le savoir structurent nos idées, orientent notre pensée¹. À celles et ceux qui donnent accès aux sources bibliographiques et documentaires, particulièrement aux Services Communs de Documentations des universités publiques et catholiques de Lille, mais aussi de Montpellier.

Je témoigne toute ma reconnaissance à Carmen, pour son soutien affectif et moral, et sa contribution tout au long de ce cheminement plus que tortueux. Je remercie Angela (18 ans) et Luis (20 ans) pour leurs patiences et aimables tolérances, sans lesquelles la réalisation de ce projet n'aurait pas été possible. Enfin, une pensée émouvante à mes parents, sans qui je ne serais rien. Autant de souvenirs qui évoquent que le temps s'écoule vite et que je devrais me consacrer davantage aux miens avant qu'il ne soit trop tard. Toutefois, il convient de poursuivre cette aventure multiculturelle passionnante dans l'histoire des sciences et des techniques pour donner sens à la vie.

¹ On pense au refus de la validation de la thèse sur le potentiel thermodynamique de Pierre Duhem (1861-1916) pour des critères académiques, dont les écrits historiques et épistémologiques, entre autres : *Les Origines de la statique* (1903), *L'évolution de la mécanique* (1905), *Études sur Léonard de Vinci, ceux qu'il a lus, ceux qui l'ont lu* (1906-1913) peuvent servir d'exemples pour des recherches doctorales en histoire des sciences et des techniques dans de nombreuses disciplines. Des modèles d'explorations et de synthèses que j'aimerais suivre dans ma discipline des STAPS (Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives), tout en reconnaissant ne pas avoir les capacités intellectuelles et scientifiques de l'auteur.

Table des matières

Remerciements	1
Préambule	7
SECTION II. SYNTHÈSES ET PERSPECTIVES DES TRAVAUX	15
INTRODUCTION GÉNÉRALE	16
1) Une certaine connotation de l'histoire de l'animal.....	20
2) L'étude du mouvement pour comprendre la vie.....	22
3) D'une démarche du visible compliqué à de l'invisible simple.....	24
4) Le défi théorique et expérimental d'une œuvre.....	26
5) Une période de turbulences scientifiques : la iatomécanique.....	29
6) Une réponse au cheminement complexe.....	31
PARTIE I. OBSERVATIONS PHYSIOLOGIQUES ET MÉCANIQUES DU MOUVEMENT :	
AUTOUR DE LA PENSÉE D'ARISTOTE ET DE QUELQUES ANCIENS	34
Introduction (1)	35
Chapitre 1. Les premières représentations de la vie en mouvement	40
1) Les peintures rupestres et hiéroglyphiques du déplacement animal.....	40
2) L'observation de la vie dans la dissection des corps.....	43
3) Les phénomènes de la vie selon la théorie du pneuma.....	44
4) La vie entre matérialisme et spiritualisme.....	45
Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal	48
1) Un philosophe en quête de savoir.....	48
1. La valeur de l'observation.....	51
2. L'anatomie comparée.....	51
3. Le rôle de l'âme.....	54
4. La diversité des causes.....	55
2) Le traité de la Marche des animaux.....	58
1. L'authenticité du traité.....	58
2. Le style et la méthode de la démarche.....	60
3. Une vision globale du traité.....	62
4. Les six directions de la locomotion.....	64
5. Le sens du mouvement.....	67
6. La marche.....	76
7. Le centre de gravité.....	77
8. Des points d'appui pour pousser et tracter.....	78
9. Un déplacement à moindre coût selon les dimensions de l'espace.....	78

10. De la mécanique à la physiologie.....	80
Chapitre 3. Quelques Compromis théoriques sur la progression animale.....	82
1) L'Antiquité	82
1. Lucrèce.....	82
2. Pline l'ancien.....	83
3. Claude Galien.....	88
2) Le Moyen Âge	92
1. Isidore de Séville.....	93
2. Albert le Grand.....	95
3) La Renaissance.....	97
1. Léonard de Vinci.....	99
2. Jean Fernel.....	105
3. André Vésale.....	107
4. William Harvey.....	110
5. René Descartes.....	113
6. Pierre Gassendi.....	117
7. Claude Perrault.....	119
8. John Wallis.....	123
Conclusion (1).....	124
PARTIE II. LA IATROMATHEMATIQUE DANS L'ŒUVRE DE GIOVANNI ALFONSO BORELLI :	
MOUVEMENT QUANTIFIÉ	129
Introduction (2).....	130
Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle	135
1) Une vie parsemée de turbulences	135
2) Des travaux éclectiques de qualité.....	141
3) Production scientifique borellienne	148
1. Les écrits biologiques et médicaux.....	149
Chapitre 2. Considérations générales sur le <i>De motu animalium</i>.....	153
1) La description des parties du livre.....	156
2) Une démarche méthodologique.....	162
3) Un fonctionnement expérimental	167
4) Les supports théoriques mathématiques, anatomiques et physiologiques.....	169
5) Une certaine conception anatomo-physiologique du muscle et de sa contraction	171
Chapitre 3. Remarques sur certaines propositions du <i>De motu animalium</i>.....	176
1) De l'action des os et de leurs dépendances dans la locomotion : les leviers.....	176
1. Petite logique des leviers appliquée à l'anatomie fonctionnelle.....	177
2. Exemple critique de l'application du levier sur la flexion de l'avant-bras.....	184

2) Intérêts et limites de la démarche physico-mathématique borellienne.....	190
3) La cause mécano physiologique de la contraction musculaire.....	198
4) Les esprits animaux.....	199
5) Les hypothèses vitalistes de Paul-Joseph Barthez.....	202
Conclusion (2).....	205

**PARTIE III : BIO-MECANIQUE DE LA LOCOMOTION : MAREY, D'ARCY THOMPSON,
MCNEILL ALEXANDER, BEJAN..... 210**

Introduction (3).....	211
1) Des représentations pour mieux formaliser les mouvements.....	211
a. Commentaires de Marey sur les études de Borelli dans La machine animale.....	216
2) La prédilection de la démarche expérimentale physico-mathématique.....	219
3) Les lois des proportions corporelles.....	222
Chapitre 1. Permanences et dépassements des modèles analogiques.....	224
1) L'analogie du corps à la machine.....	225
2) Les machines mécaniques élémentaires.....	226
3) Les machines énergétiques.....	228
1. Georges Demenÿ : une démarche fondée sur des lois générales.....	229
4) Les machines informationnelles.....	232
Chapitre 2. Localisation du centre de gravité.....	234
1) La station quadrupédique.....	235
2) La station bipédique.....	237
3) Le centre de gravité quiddité de l'équilibre humain et animal.....	240
4) La détermination expérimentale du centre de gravité.....	245
1. La méthode Borélienne.....	246
2. Le lit de sangle de Demenÿ.....	248
3. La méthode de la double pesée.....	249
Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique.....	251
1) Le calcul de la dépense énergétique dans la locomotion.....	252
2) La théorie du stockage et de la restitution énergétique.....	254
3) La gestion de l'énergie dans la théorie de la coévolution.....	256
4) D'une conception mécanique du corps à son fonctionnement biomécanique.....	259
1. L'énergie mécanique dans la locomotion.....	261
2. Le coût énergétique.....	261
3. Le calcul du travail et de l'énergie mécanique.....	262
4. Application du théorème de l'énergie cinétique.....	264
5. Évaluation de l'énergie mécanique et de l'énergie métabolique.....	265

Chapitre 4. Lois des proportions corporelles.....	271
1) Le nombre de William et Robert Froude.....	272
2) D'Arcy Wentworth Thompson : hypothèse dynamique de similitudes.....	273
3) Robert McNeill Alexander : Théorie d'optimisation mathématique.....	276
4) La théorie Constructale : Adrian Bejan.....	280
1. Principes généraux de la théorie.....	281
2. Les effets de l'inertie et du frottement sur le coût énergétique.....	282
3. Course, nage, vol : motricités distinctes.....	283
4. Une loi unificatrice pour les différents modes de locomotion.....	284
Conclusion (3).....	287
PARTIE IV. SEMIOPHYSIQUE SUR QUELQUES MOUVEMENTS SPORTIFS.....	292
Introduction (4).....	293
Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical.....	297
1) Évolution d'une discipline de force vers un sport de puissance.....	297
1. Des « poids et haltères » à l'haltérophilie.....	297
2. Vers une stabilisation des records.....	300
3. Seuil critique des performances aux Jeux Olympiques de Rio.....	302
4. Les deux mouvements olympiques.....	304
a. Encadré technique.....	305
5. Pourquoi s'entraîner avec des mouvements haltérophiles ?.....	306
6. Les limites de la force.....	307
2) De « la fente » à « la flexion » : un exemple de pérégrination technique.....	308
3) La détente verticale chez l'haltérophile de haut niveau.....	311
4) Présentation cinématique et dynamique de la performance à l'arraché.....	314
5) Structures sémiophysiques pour l'optimisation du tirage à l'arraché.....	317
Chapitre 2. Études de déplacements en mouvements cycliques.....	326
1) Le pédalage en BMX (Bicycle Motocross).....	326
2) Le pédalier PROrace : technologie comportant des manivelles de longueur variable.....	329
3) L'influence de l'inclinaison des roues sur le déplacement en fauteuil roulant.....	332
4) Évaluation de la résistance au déplacement du fauteuil roulant sur ergomètre instrumenté.....	336
Chapitre 3. Approches des postures et des équilibres.....	339
1) L'Appui Tendu Renversé (ATR) en gymnastique.....	339
2) L'équilibre en planche à voile et diamètre du wishbone.....	341
3) Pied directeur dominant lors de la propulsion et/ou du contrôle postural ?.....	345
4) Évaluation posturale et cycle proprioceptif préventifs de blessures chez le footballeur.....	347

Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football.....	349
1) Les jeux réduits alternative favorable à la responsabilité dans la prise de décision.....	349
2) Test de perception visuelle chez le footballeur selon le poste.....	351
3) État des lieux sur la recherche scientifique sur le gardien de football	354
4) Tests d'attention chez le jeune gardien de football.....	357
5) Équilibre et force bipédique chez le footballeur.....	361
6) Le plaisir dans la pratique du football source de bien-être. Pour un jeu responsable !	363
Conclusion (4).....	366
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	369
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	381
SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	392
RÉSUMÉ	396

Préambule

Les travaux présentés dans ce manuscrit constituent la synthèse de presque vingt ans d'activités de recherche et d'enseignement, menées dans différentes structures et laboratoires, notamment : au laboratoire d'optimisation de la performance motrice de l'UFR-STAPS et à l'INSERM XR 103 de Montpellier pour ma formation doctorale et le passage de la thèse en sciences et techniques des activités physiques et sportives (section CNU 74^e) ; au laboratoire d'études de la motricité humaine de la FSSEP lors de mon recrutement en tant que maître de conférences à l'université de Lille 2 en 1999 ; à l'unité mixte de recherche « Savoirs, Textes, Langages » pour ma deuxième formation doctorale en épistémologie, histoire des sciences et des techniques (section CNU 72^e) à l'université de Lille 3 ; enfin l'équipe de recherche septentrionale « Sport et Société » (EA 4110) absorbée dans l'unité de recherche pluridisciplinaire sport, santé, société (URePSSS, EA 7369) de l'université de Lille, l'équipe 2 responsabilité et stratégie des acteurs du sport et de l'éducation pour la thématique histoire, avec le thème : *Responsabilité et éthique du sport et de l'éducation physique au XX^e siècle*. Je tiens à remercier les différents directeurs qui m'ont accueilli et accompagné, d'abord pour mon doctorat à Montpellier puis dans le cadre de mon recrutement comme maître de conférences à Lille et la suite de ma carrière.

L'origine des recherches qui ont prélué à ma formation et à la rédaction de ce document de synthèse se situe initialement et simplement dans la perspective d'aborder l'étude du mouvement et son optimisation par les sciences de la vie et notamment la biomécanique mais aussi par les sciences humaines et sociales notamment pour la connaissance historique et épistémologique de leurs constituants. Les travaux de Pierre Rabischong,² ancien doyen de la faculté de médecine à Montpellier et ceux de Simon Bouisset ancien directeur du laboratoire de physiologie du mouvement à université Paris Sud, Orsay, représentent pour moi des exemples à suivre.

On pense parfois travailler dans son domaine scientifique de prédilection sans s'appuyer sur l'histoire. Réaliser une revue de littérature sur son axe de recherche implique déjà de se pencher sur des études effectuées par des auteurs aux travaux influencés par d'autres tendances aux origines historiques et épistémologiques plus ou moins lointaines. Finalement, tout chercheur se réfère à des enchaînements de résultats, de faits, de constats passés. Cette

² Rabischong P. *Le programme homme*. Paris : Presses universitaires de France, 2003.

Préambule

démarche devient rapidement cyclique et indispensable pour situer la ligne de conduite de ses travaux dans l'actualité d'un champ scientifique, mais aussi pour envisager d'autres perspectives.

La lecture éclectique non filtrée, biaisée et amputée, des travaux anciens, peut se révéler une source de curiosité et d'innovation. Ce patrimoine d'études, parfois abandonné, peut inspirer certaines voies d'investigation, en ravivant l'esprit critique, parfois assoupi dans le paradigme d'un seul horizon.

Notre objectif est de mieux saisir l'enchaînement des idées, des concepts, des théories, des méthodes et des outils sur la longue durée historique, pour mieux comprendre, enseigner et appliquer l'étude du mouvement notamment la biomécanique, aux problématiques d'optimisation de la locomotion des êtres vivants, aussi bien dans les domaines ergonomiques, pathologiques et sportifs. Sur le long terme, il convient d'essayer simplement et progressivement de dépoussiérer des idées et des notions oubliées, pour réactualiser des axes de recherche effacés par d'autres, plus prédominants, dont on ne sait souvent pas pourquoi et où l'on présuppose une complexité indéterminée³ ! De faire revivre les *modestes* et les *grands préventeurs*, bref « *chercher de petites étincelles dans les cendres* » pour dynamiser d'autres prospectives de recherches. Mais cela nécessite de donner la pesanteur au temps, pour analyser cette histoire dans sa longue durée, bien souvent sans conséquence.

Cette longue digression explicite notre position d'enseignant-chercheur maître de conférences entre les sciences de la vie et les sciences humaines et sociales. Un statut que l'on pourrait évoquer d'*éclectique*. Un éclectisme ambivalent ; à la fois source de pauvreté dans sa spécialisation, mais aussi garant de richesse par sa pluridisciplinarité. Le philosophe Michel Serres par son œuvre invite la pensée à vagabonder davantage « *hors des sentiers battus* »⁴, quitte à s'affranchir de méthodes, car l'humain ne crée qu'en errant ; son livre sur *le tiers-instruit* est révélateur de cette démarche. Par exemple, l'histoire des sciences et des techniques concernant le cheminement constitutif d'une discipline scientifique comme la biomécanique ou d'autres sur l'étude du mouvement ouvre des passerelles culturelles qui projettent le chercheur dans la richesse de sa discipline et le défrichage d'autres perspectives.

³ Gingras Y. *Sociologie des sciences*. Paris : Presses universitaires de France, 2013.

⁴ Serres M. *Le tiers instruit*. Paris : Gallimard, 1991.

Activité scientifique

Mes thématiques de travail se divisent en deux grands axes de recherche. Elles concernent pour une première phase, des études en sciences de la vie notamment en analyse du mouvement, selon une logique d'optimisation de performances sportives. L'autre période, plus récente, s'intéresse à des travaux plus spécifiques en sciences humaines et sociales, mais principalement sous l'angle de l'épistémologie historique, souvent centrée sur des concepts, des tendances innovantes. Ces particularismes nécessitent de retracer l'histoire des ruptures et des continuités pour mieux les comprendre et saisir l'évolution de la discipline concernée, pour ce qui me concerne, la biomécanique comme support à l'étude du mouvement. Cette tendance sur la longue durée historique est une quête permanente d'approfondissements de connaissances, qui révèle insidieusement à chaque avancée, des limites.

Axe 1. Science de la vie : analyse du mouvement / optimisation de la performance

Mots clefs : mouvements brefs et intenses / équilibre postural

Cette partie de mes recherches est centrée sur l'analyse de nombreux mouvements dans des disciplines très variées concernant souvent des actions motrices brèves et souvent aux intensités très élevées, notamment l'haltérophilie et le saut vertical. Elle débute en 1993 avec un mémoire de maîtrise à l'université de Montpellier 1, dans un cadre scientifique et expérimental très favorable à l'INSERM unité 103, notamment d'une part pour les échanges avec des étudiants venant de tous les horizons disciplinaires, mais principalement de l'ingénierie et de la médecine, d'autre part pour la disponibilité technologique exceptionnelle à l'époque. En effet, j'ai utilisé plusieurs types de plateformes de forces, des capteurs de pression, des jauges de contraintes, des systèmes opto-électroniques 3D (Elite, Vicon), des caméscopes et des systèmes vidéos avec des tables de mixages, autorisant la synchronisation de plusieurs signaux vidéos permettant ainsi l'étude de mouvements en 2D et 3D.

Le grand regret de cette période de formation, c'est de ne pas avoir publié sur chacune des expérimentations réalisées, mais aussi de rester distant de l'analyse de paramètres physiologiques, donc de l'accueil de certains laboratoires avec qui j'aurais pu collaborer en associant très étroitement la mécanique et la physiologie (Christian Préfaut, Jacques Mercier). Nous avons étudié : la détente verticale sur de nombreux sportifs de niveaux hétérogènes et d'âges différents, notamment des haltérophiles de niveaux nationaux et internationaux français, camerounais et russes, mais aussi des basketteurs de division Pro A ; les deux mouvements

Préambule

olympiques en haltérophilie sur plus de 100 haltérophiles dans le sud de la France par l'intermédiaire de Jean-Marc Apparuit CTR et Bernard Garcia DTN de cette discipline, la propulsion en canoë-kayak expérimenté sur des sportifs élites (MUC Omnisports) en piscine avec des pagaies instrumentées de jauges de contraintes, la décoche dans le tir à l'arc, le lancer franc, les techniques de déplacement par les aides-soignantes des patients alités, l'influence du port de cartables ou de sacs à dos chez les collégiens... Cette phase très importante s'est caractérisée par un D.E.A. et une thèse sur l'haltérophilie autour d'une méthodologie fondée sur une certaine représentation des variables (le paradigme de la sémiophysique) indexées depuis la localisation de singularités, de points et zones critiques. C'est en effleurant la compréhension mathématique des travaux de René Thom à la fois mathématicien et épistémologue, mais surtout en puisant certaines de ses idées dans ses ouvrages de vulgarisation qu'il semble exister un fil conducteur dans la représentation des interactions des variables analysées. Le travail sur l'haltérophilie qui aurait dû se poursuivre en couplant la mécanique, la physiologie et les neurosciences⁵ n'a pas abouti avec mon recrutement sur l'université de Lille, mais devrait permettre la rédaction d'un livre de synthèse sur « *L'apport de la technologie dans l'optimisation des mouvements chez l'haltérophile : tradition et innovation* ».

Tout en appliquant le modèle de la sémiophysique, c'est-à-dire en donnant du sens par des configurations géométriques aux variables recueillies, la thématique de l'analyse du mouvement, s'est poursuivie sur l'université de Lille et à la FSSEP, mais avec moins de matériel expérimental. Les études se sont centrées principalement sur les conséquences de différents types d'entraînement, ou cycles de préparation physique sur certaines variables de la détente verticale. L'influence des répétitions et/ou des modalités de sauts, la différenciation des contraintes de forces sur les deux jambes et le concept de raideur musculaire représentent des thématiques d'études souvent abordées par les étudiants dans la filière entraînement et optimisation de la performance. L'analyse de l'équilibre postural sur les deux pieds en relation avec la force des jambes, mais aussi, lors de la pratique du windsurf, représente une autre thématique de recherche. Enfin, la locomotion en cyclisme avec un pédalier spécifique à longueur de manivelles variables, l'analyse du pédalage en BMX par mesures télémétriques, le déplacement en fauteuil roulant selon des roues inclinées différemment et la modélisation

⁵ L'étude qui suggère que l'haltérophilie peut agir de façon bénéfique sur la structure du cerveau, avec un seuil minimum d'exercice accompli est révélatrice de ce qui pourrait se faire. (Bolanzadeh N., Tam R., Handy TC., Nagamatsu LS., Hsu CL., Davis JC., Dao E., Beattie BL., Liu-Ambrose T. Resistance Training and White Matter Lesion Progression in Older Women: Exploratory Analysis of a 12-Month Randomized Controlled Trial. *The Journal of The American Geriatrics Society*, 2015, 63(10), 52-60.)

Préambule

biomécanique du mouvement de propulsion - traction en handbike constitue un autre aspect de nos intérêts.

Dans cette deuxième partie de carrière, nous avons réussi à obtenir deux projets de financement. L'un, pour fabriquer des pédales dynamométriques à deux axes, afin d'analyser les techniques de pédalage sur deux types de pédaliers qui ont servi à réaliser une étude de master et lancer l'étudiant Xavier Nési⁶ en thèse, mais aussi à la réalisation de la thèse de Lucien Belen⁷ à l'université de Montpellier. L'autre financement concerne la fabrication de deux petites plateformes de forces qui devaient servir à l'étude de l'assise lors de la locomotion en fauteuil roulant et en handbike pour la suite du doctorat d'Arnaud Faupin.

Cette partie de carrière, sur les thématiques de l'équilibre et du fauteuil roulant, a permis l'initiation à la recherche de deux étudiants qui ont poursuivi en thèse, mais que je n'ai pu codiriger parfois pour des causes malheureuses ; celle de François Asseman,⁸ réalisée sur l'équilibre de gymnastes experts, sous la direction de Jacques Cremieux soutenue en 2004 à Toulon, mais aussi celle d'Arnaud Faupin⁹ sur la propulsion en fauteuil roulant à manivelle sous la direction d'André Thévenon à Lille, en 2005. Au préalable avec cet étudiant nous avons obtenu une bourse Cifre.

Ce travail a abouti à la réalisation de :

- 5 articles nationaux
- 11 articles internationaux
- 5 chapitres de livres
- Plus de 50 communications
- La réalisation d'un projet de préparation pour les Jeux Olympiques d'été de 2000 de Sydney concernant certains haltérophiles de Clermont Sport et de l'équipe de France
- La transmission de 4 dossiers fédéraux sur l'haltérophilie
- L'encadrement de 60 mémoires EOPS.

⁶ Nesi X. *Prédiction de la performance et de son amélioration en cyclisme sur route*. Lille : thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 2004.

⁷ Belen L. *Les pédaliers expérimentaux : effets sur la demande métabolique, sur les réponses cardioventilatoires et sur la performance de deux prototypes au cours d'épreuves d'effort*. Montpellier 1 : thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 2006.

⁸ Asseman F. *Etude du transfert d'habiletés chez des gymnastes experts dans différents maintiens posturaux*. Toulon : thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 2004.

⁹ Faupin A. *Analyse biomécanique de la propulsion en fauteuil roulant à manivelles*. Lille : thèse de doctorat en Sciences du sport, 2005.

Préambule

Axe 2. Sciences humaines et sociales : connaissance historique et épistémologique des études locomotrices

Mots clefs : créativité, inventivité, responsabilités, stratégies, techniques

Les idées libres influencent le monde de l'histoire, celle des politiques, des scientifiques, des philosophes dont les choix théoriques et pratiques modulent les représentations et les transformations sociales. Ces capacités individuelles ou collectives de créativité et d'inventivité qui imaginent de nouveaux concepts et objets en transformant les opinions et les techniques modèlent le présent pour envisager sereinement le futur. Cette thématique nous intéresse depuis l'origine de nos travaux, car les principes de l'évolution sportive, entre autres d'efficacité et de performance des techniques locomotrices dépendent de ces démarches créatives, inventives parfois de sérendipité¹⁰.

Dans ce cadre d'analyse, l'objet « techniques motrices sportives », a montré tout au long de son histoire sa faculté d'hybridation et de mutation par assimilation ou rejet des concepts, des outils et des hommes. L'imagination appliquée, constructive, créative engage aussi les stratégies et les responsabilités, des décideurs et des acteurs, qui façonnent les opinions communes de masse. Les stratégies économiques et politiques choisies orientent les déterminants sociaux vers des crises, des changements progressifs ou un continuum historique. Le problème essentiel de la cohérence des décisions des acteurs du sport et de l'éducation se pose chez l'historien - philosophe et surtout l'épistémologue pour en saisir leurs origines, leurs exploitations, mais aussi leurs portées évolutionnistes et prévisibles.

Une histoire philosophique critique des stabilités et des ruptures, sociales, politiques et intellectuelles des notions de responsabilités et de stratégies, devrait faire émerger d'autres visions (rapports, conflits, paradigmes...) pour « penser autrement » les facteurs sociaux et notamment les acteurs du sport et de l'éducation. Les grands changements historiques, les périodes de transition ou de crises majeures soulèvent des interrogations et appellent des réflexions et des débats renouvelés. La créativité et l'inventivité par exemple, dans leurs relations avec les concepts de responsabilités et de stratégies, peuvent se révéler comme un élément dévoilant ruptures et continuités, dogmatismes et idéologies.

On se propose d'examiner les perspectives que soulève une réflexion historique et philosophie des transformations épistémologiques de la créativité comme moteur de

¹⁰ Le fait de réaliser une découverte scientifique ou une invention technique de façon inattendue à la suite d'un concours de circonstances fortuit.

Préambule

modifications des techniques. L'impact de la technique sur ces transformations occupe une place majeure dans cette problématique. Quelles sont les stratégies et les responsabilités sous-jacentes engagées des acteurs dans la créativité et l'inventivité comme moteurs scientifiques de développements et de progrès ? Quels sont les paradigmes les plus pertinents pour penser ces concepts, associer les connaissances, envisager « des sociétés inclusives, novatrices »...

Les démarches concomitantes historiques, philosophiques et épistémologiques des concepts de stratégies et de responsabilités pour appréhender le rôle de la créativité dans la technologie peuvent ouvrir des perspectives sur la compréhension sociale, depuis les logiques de découvertes scientifiques qui par-delà cette chimère poussent la science au progrès. Il est possible d'envisager d'autres perspectives latentes pour anticiper des développements, vers un autre type de société.

Pour l'instant, le travail porte sur l'étude des pratiques et des techniques du corps comme les postures, les mouvements, les locomotions dans différentes activités sportives. Il obéit à un objectif spécifique celui de comprendre les trajectoires historiques et épistémologiques des concepts, des méthodes et des réalisations pour évoquer les influences et les logiques d'optimisation des motricités d'hier et d'aujourd'hui.

Cet axe de recherche est la conséquence d'un second cycle de formation de six ans, en « épistémologie, histoire des sciences et des techniques ». Il a abouti pour l'instant à la réalisation :

- d'un livre après deux ans de traduction, *De motu animalium / Du mouvement des animaux. Essai de traduction. (606 pages)* du iatromathématicien Giovanni Alfonso du XVII^e siècle, qui se trouve à l'origine entre autres de l'application des principes et des lois mécaniques à la compréhension de la locomotion.
- D'un second livre sur, *Quelques recherches sur la locomotion. Filiations historiques et épistémologiques (458 pages)*.
- D'un troisième livre sur, *Odyssée dans « La Culture Physique » (1904-1962). Anthologie de quelques discours responsables sur une quête d'harmonie : Santé, Beauté, Force. (272 pages)*, qui traite du développement d'une activité physique (conceptions historiques, philosophiques, scientifiques et méthodologiques) qui donnera naissance à une discipline sportive compétitive l'haltérophilie (pour un prochain livre, *Anthropologie de la naissance d'une discipline sportive compétitive :*

Préambule

l'haltérophilie. Ses racines historiques et culturelles).

- 2 articles nationaux
- 3 articles internationaux
- 10 communications
- 2 chapitres de livres
- 11 encadrements de mémoires Master sur des thématiques historiques.

Section II. Synthèses et perspectives des travaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'origine des recherches qui ont prélué à cet axe de travail se situe simplement dans la perspective d'aborder l'étude du mouvement et son optimisation, par la connaissance historique et épistémologique de ses constituants. Mieux saisir l'enchaînement des idées, des concepts, des théories, des méthodes et des outils sur la longue durée historique, pour mieux comprendre, enseigner, et appliquer la biomécanique aux problématiques d'optimisation de la locomotion sur les êtres vivants, aussi bien dans les domaines sportifs, ergonomiques, que pathologiques.

Ces études ont commencé par la réalisation d'un DEA en Philosophie, Histoire des sciences et des techniques, intitulé « *Préceptes biomécaniques, dans l'interprétation du traité de la marche des animaux d'Aristote. Genèse et Odyssée de l'étude de la locomotion.* » et d'un cycle de six ans de formation doctorale en Epistémologie, histoire des sciences et des techniques sur des « *Recherches historiques sur les théories de la locomotion animale* ». Elles se caractérisent par la rédaction de trois livres, chaque fois d'une durée de travail, de plusieurs années :

La traduction d'un livre de Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) sur le mouvement des animaux (Appelé finalement, *De Motu animalium* (1680-1681), car il était très délicat au XVII^e siècle d'expérimenter sur la physiologie et l'anatomie de l'homme et d'en parler ouvertement en donnant des principes explicatifs sur les logiques de fonctionnement et les préceptes de vie sans s'attirer les foudres de l'autorité religieuse). C'est un livre fondamental, car d'une part recueille les études d'une vie d'iatromécanicien, mais surtout, parce qu'il établit une synthèse des études scientifiques antérieures. Cette compilation historique et épistémologique marque une étape de la connaissance sur la locomotion des animaux, mais aussi celle de l'homme. Elle mérite d'être connue pour percevoir la lente élaboration des processus de savoirs, l'agencement des idées et des théories. Dans ce grand livre savant de la fin du XVII^e siècle, Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) étudie en deux parties ses expériences, ses conceptions théoriques des corps de l'homme et de l'animal, dans leurs mouvements et locomotions. Illustré de figures devenues récurrentes dans certaines études historiques et épistémologiques de la biomécanique, le savant italien explique avec foi et responsabilité sa méthode iatromécanique pour comprendre la vie et son fonctionnement. En produisant cette iconographie mécanique appliquée au

Introduction générale

biologique, Borelli a ouvert la voie à des domaines fertiles et spécifiques de la science médicale. Parfois méconnue, cette œuvre occupe une place majeure dans l'anthropologie de la biomécanique.

La seconde étude associée à la traduction *Du motu animalium* aboutit à la rédaction d'un livre sur une quête de filiations historiques et épistémologiques de quelques théories de la locomotion en 2017. Elle a débuté avec la connaissance des analyses critiques^{11,12,13} très intéressantes d'une équipe de mécaniciens / biomécaniciens de l'université de Poitiers dirigée à l'époque par Alain Junqua, sur les travaux d'Étienne-Jules Marey (1830-1904) et de Georges Demeny (1850-1917) concernant l'étude de la détente verticale. En effet, ces derniers associaient à l'époque de manière originale deux technologies, la chronophotographie pour décomposer chronologiquement les phases du mouvement avec l'élaboration d'une des premières « table dynamométrique »¹⁴ pour l'acquisition et le traitement des forces exercées au sol. Deux instruments de mesure, maintenant perfectionnés que possède en autres, tout laboratoire de biomécanique, pour faire des acquisitions cinématiques, cinétiques et dynamiques afin de décrire et comprendre le mouvement¹⁵. Les relations entre Marey et Borelli se révèlent naturellement dans les nombreuses occurrences localisées dans *La machine animale* de 1873 et qui permettent de comprendre l'évolution des méthodes de l'étude du mouvement.

Le troisième livre aborde l'histoire d'un courant de musculation, la culture physique depuis la consultation des numéros de la revue *La culture Physique* publiée de 1904 à 1962, le corpus des textes qui traverse pratiquement un siècle d'histoire des idées représente un marqueur intéressant, original et logique des évolutions et des transformations des théories et des pratiques de ce type d'activité physique. Le présent ouvrage propose une anthologie de quelques-uns de ces textes qui donnent arguments pour percevoir les ancrages historiques, épistémologiques et culturels d'une activité aux origines finalement ancestrales. Il s'agit de défricher le cheminement des idées, des méthodes et des techniques pour dévoiler des logiques apparentes de parcours scientifiques et de pratiques entre autres corporelles, abandonnées,

¹¹ Lacouture P., Junqua A. Plate-forme de forces et analyse du geste sportif. *Revue Science et Motricité*, 1991, 15 : 41-51.

¹² Duboy J., Junqua A., Lacouture P. L'introduction des concepts de la mécanique dans l'analyse des gestes athlétiques. La contribution des deux précurseurs : E.J. Marey et G. Demeny. *Revue Science et Motricité*, 1992, 18 : 35-44.

¹³ Junqua A., Duboy J., Lacouture P. *Mécanique humaine - éléments d'une analyse des gestes sportifs en deux dimensions*. Paris : Édition Revue EPS, 1994.

¹⁴ Marey E.J. *De la mesure dans les différents actes de la locomotion*. Paris : Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1883, 97 : 820-825.

¹⁵ <http://www.sciencesetsport.fr/>

Introduction générale

transformées, créées. La trajectoire de la culture physique chemine autour d'une quête de vérités scientifiques où les praticiens, tout en faisant référence aux canons de l'histoire antique des représentations du corps, expérimentèrent en mettant à l'épreuve les conceptions théoriques médicales et les méthodes de culturisme et de musculation pour incarner par leur esthétique plastique, la santé et la force. Cette odyssee à approfondir et à méditer, évoque la vertu et la noblesse de croire en la panacée d'haltères, de barres et d'exercices pour raviver, maintenir et optimiser les grandes fonctions modelant des hommes complets, des athlètes sains de corps et d'esprit, pour une société meilleure.

L'objectif sur le long terme est d'essayer simplement et progressivement de dépoussiérer des idées et des notions oubliées, de réactualiser des axes de recherche effacés par d'autres prédominants, dont on ne sait souvent pas pourquoi ! De faire revivre les modestes et les « *grands préventeurs* »¹⁶, bref « *chercher de petites étincelles dans les cendres* » pour dynamiser d'autres perspectives de recherches, mais cela nécessite de donner du temps au temps, pour analyser l'histoire dans sa longue durée¹⁷.

C'est ce que nous avons essayé de réaliser ces dernières années avec ces différentes études sur la longue durée historique, mais aussi sur la durée de vie d'un individu, montrer des filiations de contenus autour de la pensée de certains auteurs qu'il s'agisse d'Aristote, Borelli, Marey, Desbonnet, mais aussi bien d'autres.

Ce travail n'est pas dépendant de mon métier d'enseignant et de chercheur spécifique en STAPS centré sur l'encadrement des étudiants dans l'analyse du mouvement, mais aussi de son optimisation par la préparation physique, car il est associé à la connaissance historique et épistémologique des transformations technologiques. Il est convenable de connaître l'histoire de sa discipline et les objets de sa recherche en ce qui me concerne le mouvement et la locomotion, car « *l'histoire peut aussi être une source d'innovation en ce qu'elle fournit un formidable atout pour raviver l'esprit critique des chercheurs souvent assoupis dans le paradigme qui est leur seul horizon.* » (Stengers, Bensaude-Vincent, 2003)¹⁸. D'autre part

¹⁶ Dans une série de biographies relatant l'histoire des précurseurs lointains de la médecine du travail et de la sécurité, Valentin M. avait employé ce terme. Les grands préventeurs, suite de 22 biographies de précurseurs de la médecine et de la sécurité du travail, parues dans la revue Sécurité et Médecine du Travail (S.M.T. n°1 à 22). Ouvrage couronné par l'Institut avec le Prix Maisondieu de l'Académie des Sciences Morales et Politiques en 1974. En 1978, il publia un ouvrage plus détaillé qui y faisait suite : *Travail des hommes et savants oubliés : histoire de la médecine du travail, de la sécurité et de l'ergonomie*. Paris : Éditions Docis DL, 1978.

¹⁷ http://www.biomecanique.org/files/Les_pionniers_en_Biomcanique_-_1re_dition_.pdf

¹⁸ Stengers I., Bensaude-Vincent B. *100 mots pour commencer à penser les sciences*. Paris : Les Empêcheurs de penser en rond, Le Seuil, 2003.

Introduction générale

depuis le début de notre formation universitaire des penseurs entre autres comme René Thom¹⁹, Michel Serres²⁰ et Edgar Morin²¹ éclairent nos pensées principalement selon des approches riches multidisciplinaires plus par goût et quête de rationalité méthodologique personnelle que nécessité d'enseignement universitaire. Ce qui me semble fondamental, c'est qu'ils invitent à percevoir les problématiques dans la complexité de leur vérité finalement momentanée multidifférenciée et multiréférencée.

L'étude historique des théories de la locomotion embrasse les questions épistémologiques majeures qui se rattachent à la connaissance des phénomènes expliquant le mouvement dans l'ordre biologique. Tous les organismes vivants manifestent leurs qualités de vie par ce caractère commun et exclusif d'accomplir des mouvements d'ensemble, ou partiels, dont ils trouvent le point de départ en eux-mêmes. Pour les anciens philosophes mécaniciens et physiologistes, la vie, c'est avant tout la compréhension des préalables théoriques du déplacement par la connaissance des rôles de l'âme, des esprits animaux, de la force vitale... Leurs tentatives à construire des modèles de compréhension de la locomotion au cours de la longue durée historique situent leurs pensées entre un matérialisme scientifique mécanisé et mathématisé tangible et un idéalisme métaphysique physiologique invisible.

La faculté de changement de lieu ou de place est un des attributs de l'homme. Initialement sa sensibilité l'oblige à fuir ou à se défendre, dans ce cadre la mobilité se révèle un principe de réussite d'évolution. Une stratégie de survie qui permettra de conquérir sans cesse de nouveaux espaces plus favorables, de fuir les prédateurs et d'évoluer vers des systèmes sociaux. Il est a priori inutile de justifier une réflexion sur le mouvement et plus précisément sur la locomotion, car le corps en vie semble nous imposer quotidiennement le déplacement comme moyen de subsistance. C'est en effet par le corps et son action que l'homme ressent, désire, agit, s'exprime et crée. Aucune autre intensité de sensation sur la conception de vie ne s'offre plus aux êtres vivants que dans les formes concrètes et singulières d'un corps mobile, attrayant ou non, rassurant ou menaçant. Vivre en ce sens n'est pour chaque organisme biologique qu'assumer les conditions de développement dont les structures, les fonctions et les pouvoirs donnent satisfaction aux besoins primaires et accès à la découverte du monde.

¹⁹ Thom R. *Esquisse d'une sémiophysique : Physique aristotélicienne et théorie des catastrophes*. Paris : InterÉditions, 1989.

²⁰ Serres M. *Le tiers-instruit*. Paris : Éditions François Bourin, 1991.

²¹ Morin E. *Introduction à la pensée complexe*. Paris : ESF éditeur, 1990.

Introduction générale

L'étude épistémologique et philosophique de l'avancée des idées, du progrès des théories explicatives de la locomotion, au cours de la longue durée historique de la pensée de l'homme, infiltre la complexité du vivant et son univers de connaissances. Elle conduit à une approche multidimensionnelle de la locomotion par des références nécessaires à des courants de pensée multi référencés. Ils rendent difficile la circonscription de l'étude selon une trame imaginée rationnelle ; mais les tentatives et les perspectives se révèlent culturellement riches. La compréhension de nombreuses controverses théoriques biologiques actuelles émerge de la connaissance des contextes historiques d'origine. Les idées, les concepts et les théories s'enracinent dans le passé où l'étude épistémologique révèle le cheminement de leurs modifications, transformations et mutations.

1) Une certaine connotation de l'histoire de l'animal.

Le 2 février 2007, lors d'une émission radio sur France Inter, intitulée *2000 ans d'histoire*, le responsable Patrice Gélinet, propose un grand voyage dans l'histoire de l'ours avec son invité Michel Pastoureau²² pour son livre intitulé *L'ours. Histoire d'un roi déchu*²³. À la question du présentateur : « *Vous venez de publier au Seuil, une histoire unique, je crois que personne ne l'a encore écrite, donc, elle est totalement inconnue, c'est l'histoire de l'ours. Est-ce que pour un historien, c'est bien sérieux de s'intéresser à l'histoire de l'animal ? On pense toujours au fond, que les animaux n'ont pas d'histoire* » l'historien médiéviste, directeur d'études à l'École Pratique des Hautes Études répond : « *Oui, pendant longtemps ce n'était pas un sujet sérieux, l'animal était abandonné à la petite histoire et quand j'étais étudiant, il y a une quarantaine d'années, c'était impensable de consacrer une thèse ou un mémoire quelconque à l'histoire des animaux ou à l'histoire d'un animal. Les choses ont bien changé heureusement depuis une génération à peu près, grâce à quelques historiens pionniers, grâce au contact aussi des historiens avec les zoologues, les ethnologues avec les anthropologues donc aujourd'hui ça n'est plus impossible, on peut même dire que l'animal est devenu un sujet carrefour et digne de la grande histoire* ». ²⁴

Quelle que soit la connotation personnelle de cette histoire de l'animal « petite » ou « grande », sa connaissance n'est pas à négliger, car indirectement elle instruit aussi sur l'histoire de l'homme. L'histoire naturelle du cheval, parfois, mieux connue que celle de l'homme, semble un bon exemple comme marqueur fort de notre évolution. Elle

²² Historien, archiviste paléographe et directeur d'études à l'École Pratique des Hautes Études (4^e section), depuis 1983 occupe à la Sorbonne, la chaire d'histoire de la symbolique occidentale.

²³ Pastoureau M. *L'ours. Histoire d'un roi déchu*. Paris : Édition du Seuil, 2007. (Il existe une sorte de problématique dans l'écriture de l'intitulé notamment pour le mot histoire avec ou sans « h » majuscule. Sa considération et sa représentation pouvant être différente, ce qui n'est pas le cas pour « ours » ou « roi ».

²⁴ <http://www.radiofrance.fr/franceinter/em/2000ansdhistoire/index.php?id=67273>

Introduction générale

faisait dire à Alphonse Toussenel, en 1847, « *Le cheval est l'expression de la société... Dites-moi le cheval d'un peuple, je vous dirai les mœurs et les institutions de ce peuple. L'histoire du cheval est la personnification de l'aristocratie de sang, de la caste guerrière, et de toutes les sociétés, hélas ! Ont dû passer par l'oppression de la caste guerrière* »²⁵. Les modifications des représentations picturales et sculpturales, mais aussi des utilisations techniques et technologiques du cheval révèlent nos conceptions et nos représentations du moment sur le corps ; son fonctionnement anatomique apparent, sa physiologie sous-jacente, mais aussi sa logique mécanique et mathématique.

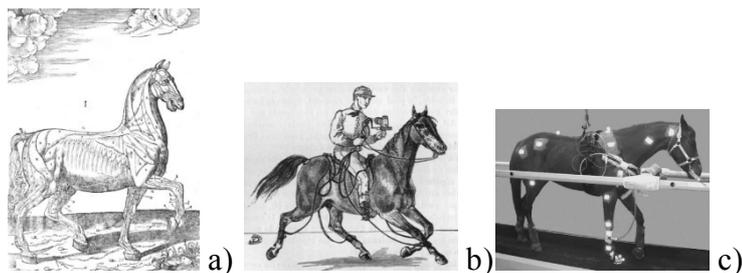


Figure 1. a) Représentation anatomique du cheval dans le premier ouvrage moderne sur les chevaux. Ruini C. révèle indirectement l'essor des études anatomiques, mais aussi l'intérêt de la compréhension physiologique du fonctionnement de la circulation sanguine au XVI^e siècle. (*Anatomia del cavallo, infermita, et suoi rimedii, opera... del sig. Carlo Ruini, senator Bolognese, adornata di bellissime figure, le quali dimostrano tuta l'Anatomico di esso cavallo. Venetia : appr. G. Bindoni, 1602*) b) Figure qui montre un cheval muni de différents appareils explorateurs de pression avec le cavalier portant l'enregistreur des allures. L'expérimentation technologique éclaire l'acquisition de nouvelles informations sur les mouvements rapides (Marey É-J. *La machine animale*. Paris : Félix Alcan Éditeur, 1873) c) Photo d'un cheval évoluant sur tapis roulant, équipé de semelles dynamométriques et de différents marqueurs rétro réfléchissant, les analyses dynamiques et cinématiques permettent d'élaborer des modélisations physiologiques et biomécaniques de la locomotion. (Roland E., Hulla M., Stover S. « *Design and demonstration of a dynamometric horseshoe for measuring ground reaction loads of horses during racing conditions* ». *Journal of Biomechanics*, 2005, n°38, p. 2102-2112).

L'homme ne peut omettre l'intérêt et l'utilité de la connaissance de l'histoire de l'animal quand il se reconnaît et s'étudie sans cesse dans celle-ci par assimilation et distinction. En effet, l'homme, avec la configuration de ses organes intérieurs, se situe proche de nombreux animaux appartenant à l'ordre des mammifères, tandis que de par sa structure extérieure, il rappelle les quadrumanes ou singes, qui viennent immédiatement au-dessous de lui dans l'échelle des êtres vivants. De manière similaire l'homme ou les animaux exécutent avec leurs organes présents à l'identique, des fonctions dont l'ensemble constitue la vie. Parmi ces nombreuses fonctions, se distinguent celles principalement attribuées à la respiration, la circulation, la digestion, la nutrition, la sécrétion, l'ossification, l'irritabilité, la sensibilité et la génération.

²⁵ Toussenel A. *L'esprit des bêtes : vénerie française et zoologie passionnelle*. Paris : librairie Sociétaire, 1847, p. 179.

Introduction générale

Cependant comme l'écrivait Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon au cours de la rédaction de son œuvre majeure, l'*Histoire naturelle, générale et particulière avec la description du cabinet du Roy* paru de 1749 à 1789 en trente-six volumes : « *En comparant l'homme à l'animal, on trouve dans l'un comme dans l'autre un corps, une matière organisée, de la chair, du sang, du mouvement et une infinité de choses semblables. Mais toutes ces ressemblances sont extérieures et ne suffisent pas pour nous faire dire que la nature de l'homme soit semblable à celle de l'animal.* »²⁶

Lors des études en histoire naturelle, au-delà de comparaisons possibles entre l'homme et les animaux, pour Buffon comme avec bien d'autres naturalistes, il faut « *s'élever à quelque chose de plus grand et plus digne* »²⁷ que la simple accumulation d'observations et d'expériences sur la nature. Il convient avec rigueur et logique de découvrir son secret. Ce qui faisait dire en 1822, au naturaliste, anthropologue et philosophe de la nature Julien Joseph Virey lors de ses cours fait à l'Athénée royal de Paris que : « *Parmi toutes les sciences, celle de l'Histoire naturelle, prise dans sa généralité, devient l'une des plus nobles et des plus dignes de l'homme, parce qu'elle lui révèle son rang, ses attributions, ses devoirs et sa destinée sur le globe ; parce qu'elle coordonne en quelque manière autour de lui tous les êtres de la création, et qu'enfin elle nous manifeste plus qu'aucune autre science les magnifiques desseins du Grand-Être dans l'Univers.* »²⁸ Depuis son lointain passé, cette science étudie les constituants de tous les corps existants à la surface et dans l'intérieur de la terre ; aussi bien par l'examen de la structure des minéraux, le plus souvent sans aucun signe d'organisation vitale, que par l'analyse des êtres vivants organisés pour l'existence. En élaborant les lois de leur fonctionnement et de leur activité pour vivre, l'homme essaye de se rapprocher du « Grand Concepteur » pour se les appliquer, afin d'essayer de prolonger son existence.

2) L'étude du mouvement pour comprendre la vie

La biologie, ou étymologiquement science de la vie²⁹ fondée dans la même année 1802 par deux auteurs séparément, Jean-Baptiste de la Lamarck et Gottfried Reinhold Treviranus « *doit être l'étude des forces et des phénomènes de la vie, les conditions et les lois d'après*

²⁶ Buffon G.-L. *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du cabinet du roy*. Paris : Imprimerie royale, tome deux. 1749, p. 437.

²⁷ Buffon G.-L. *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du cabinet du roy*. Paris : Imprimerie royale, tome premier. 1749, p. 51.

²⁸ Virey J. J. *Histoire des mœurs et de l'instinct des animaux*. Paris : libraire Deterville, 1822, p. 1.

²⁹ Mayr E. *Histoire de la biologie : diversité, évolution et hérédité*. Paris : Fayard, 1989, p. 609.

Introduction générale

lesquelles cet ordre de choses existe, et les causes en raison desquelles il a lieu ». ³⁰ Elle représente cette subdivision spécifique qui s'intéresse à l'animal du radical *anima* désignant l'âme ou principe de vie. Ainsi l'animal se définit comme un être vivant animé de l'intérieur, doué de mouvements volontaires et de sensations, mais qualifié pour le distinguer de l'homme ; d'être « *qui n'est pas doué de raison* ». Ce critère de rationalité distinguant nécessairement l'homme de l'animal, semble arbitraire devant les différentes fonctions qui les constituent et en particulier la locomotion.

La faculté de changement de lieu ou de place est un des attributs exclusifs des animaux et de l'homme, car aucun végétal ne possède ni la volonté ni le pouvoir de sortir de sa localisation pour s'implanter ailleurs. De ce fait, pour la plante, la nourriture doit y parvenir, tandis que pour l'animal, au contraire, sa destinée se trouve dans la recherche de ses aliments. De plus, la nature a créé les animaux dont la sensibilité les oblige à fuir ou à se défendre. On peut dire que la mobilité se révèle un principe de réussite de l'évolution animale. Une stratégie de survie qui permettra de conquérir sans cesse de nouveaux espaces plus favorables, de fuir les prédateurs et d'évoluer vers des systèmes sociaux, contrairement aux plantes, dépendantes de conditions de vie locales.

Il est a priori inutile de justifier une réflexion sur le mouvement et plus précisément sur la locomotion, car le corps en vie, semble nous imposer quotidiennement le déplacement comme moyen de subsistance. C'est en effet par le corps et son action que l'homme et l'animal ressentent, désirent, agissent, s'expriment et créent. Aucune autre intensité de sensation sur la conception de vie, ne s'offre plus aux êtres vivants que dans les formes concrètes et singulières d'un corps mobile, attrayant ou non, rassurant ou menaçant. Vivre, en ce sens, n'est pour chaque organisme biologique qu'assumer les conditions de développement dont les structures, les fonctions et les pouvoirs donnent satisfaction aux besoins primaires et accès à la découverte du monde.

L'histoire des animaux, abordée selon les avancées des connaissances sur la compréhension de leurs mouvements et de leurs locomotions, constitue le moyen d'assimiler l'histoire de l'homme depuis l'évolution de ses conceptions théoriques et de ses progrès technologiques. L'étude épistémologique et philosophique de l'avancée des idées, du progrès des théories explicatives de la locomotion, conduit à une approche

³⁰ Treviranus G. R. *Biologie : oder Philosophie der lebenden Natur für Naturforscher und Aerzte*. Göttingen : bey J. F. Röwer, 1802, t. 1, p. 4.

Introduction générale

éclectique de la locomotion animale par des références nécessaires à des courants de pensée multiréférencés. Ils rendent difficile la circonscription de l'étude selon une trame imaginée rationnelle ; mais les tentatives et les perspectives se révèlent culturellement riches.

3) D'une démarche du visible compliqué à de l'invisible simple

Les recherches historiques pour appréhender les connaissances sur la vie, tout comme celles sur les théories de la locomotion, se plongent dans un passé qui se dessine au-delà du siècle, faisant défiler les majeures hypothèses explicatives et philosophiques du mouvement physiologique. Depuis sa représentation picturale avec du charbon ou du sang sur une paroi de caverne jusqu'à l'imagerie des activités neuroniques des aires cérébrales visualisables par résonance magnétique lors de tests posturologiques pour appréhender l'avancée d'une maladie sur la détérioration de l'équilibre, l'histoire du mouvement est présente et nécessaire.

À toutes les époques, à mesure que la connaissance de la nature progresse, le hasard et l'arbitraire s'effacent pour être remplacés selon les lois et les théories énoncées par des penseurs qui se sont déclarés plus ou moins contre la liberté de la volonté humaine. Comme le note Jean-Pierre Luminet, dans son premier roman biographique en forme de réflexion sur la science, intitulé *Le secret de Copernic* de sa trilogie future sur *Les Bâtisseurs du ciel* avec *Kepler, la discorde Céleste* et *Newton, le dernier des alchimistes* : « Au cours des XVI^e et XVII^e siècles, une poignée d'hommes étranges, des savants astronomes, ont changé de fond en comble notre façon de voir et de penser le monde. Ils ont été des précurseurs, des inventeurs, des inspireurs, des agitateurs de génie... Mais pas seulement. Ce que l'on ignore généralement - peut-être parce que leurs découvertes sont tellement extraordinaires qu'elles éclipsent les péripéties de leur existence, c'est qu'ils ont été aussi des personnages hors du commun, des caractères d'exception, de véritables figures romanesques dont la vie fourmille en intrigues, en suspense, en coup de théâtre... »³¹ Ce fut le cas aussi des savants physiologistes lors de l'humanisme italien, puis européen, du XVI^e siècle qui jugent le corps digne que l'on s'occupe de lui non pas simplement pour lui assurer la santé, mais pour procurer à la nature humaine une éducation totale afin de favoriser, épanouissement et élévation.

L'influence des travaux du savant Giovanni Alfonso Borelli à la triple formation de mathématicien, astronome et physiologiste se situe aux croisées et frontières de ces univers infiniment grands et petits. Il « transporte la philosophie dans la médecine et la médecine dans la

³¹ Luminet J.-P. *Le secret de Copernic*. Paris : Editions Jean-Claude Lattès, 2006, p. 9-10.

Introduction générale

philosophie »³² pour constituer, par le courant iatromathématique commencé, une étape unique dans la vision du corps et de son mouvement. Jacobus Moleschott au milieu du XIX^e siècle lors d'un cours sur l'unité de la vie, le décrit d'une manière apologétique : « *Arrive Borelli. Il fait connaître les vrais rapports entre les muscles comme forces et les os comme leviers, dans son célèbre ouvrage intitulé De motu animalium ; il étudie les propriétés physiques du sang, la formation des caillots, la séparation du sérum ; il expose un des plus importants théorèmes de la respiration, les poumons et l'air sont passifs ; que les facteurs actifs sont représentés par le diaphragme et par les muscles intercostaux ; que l'expiration normale n'exige le concours d'aucune activité musculaire ; que le diaphragme se relâche, et que dans ce relâchement l'élasticité des poumons et des côtes suffit pour diminuer le volume de la capacité thoracique ; que dans la respiration, l'air se mêle au sang pour entretenir la vie des animaux. Voyez la physique, les mathématiques, la mécanique, exciter, expérimenter, éclaircir, et enfin mesurer l'action du cœur et du diaphragme, c'est-à-dire des viscères, auxquels appartient, de concert avec le cerveau, le rôle capital dans la production des phénomènes vitaux. Ne vous étonnez donc pas si, à dater de ce moment, on commence à parler d'une école iatromathématique, iatromécanique.* »³³

Sa science expérimentale s'exprime sous la forme d'un précepte simple « rendre visible l'invisible, extérioriser l'invisible, précepte diamétralement opposé à l'adage célèbre selon lequel la science a pour but de ramener le visible compliqué à de l'invisible simple »³⁴ pour le mathématiser. Les hypothèses mécaniques du savant, essaient, mais très difficilement, dépurer ses références à la subjectivité, pour ne s'occuper que de la logique des relations entre les propositions. Borelli essaye d'élaborer un raisonnement intelligible qui se veut au-delà de l'apparence sensible, pour construire une méthode ou plus exactement une théorie scientifique comme « résumé d'intrigue »³⁵. Il condense, lors de certains raisonnements et équations mathématiques, une logique qui peut se généraliser pour l'explication des mouvements des êtres physiologiques indifféremment des milieux. Sur les traces de son maître, il essaye de fonder une théorie comme : « *La Théorie de Galilée qui explique la voie que la nature suit dans l'accélération des corps pesants, est donc*

³² « Transporter la philosophie dans la médecine signifie, non pas prêter à la philosophie une vertu thérapeutique (la philosophie n'est pas un remède), mais faire sortir la médecine de l'empirisme : la rendre rationnelle et scientifique ». Fagot-Largeault A. *Leçon inaugurale. Chaire de philosophie des sciences biologiques et médicales*. Paris : Collège de France, 2001, p. 5.

³³ Moleschott J. L'unité de la vie. Traduit de l'italien par Odysse-Barot. *Revue des cours scientifiques de la France et de l'étranger*. Paris : Germer Baillière, libraire-éditeur, 1863-1864, p. 589.

³⁴ Debru C. « La chimie, formation de modèles morphologiques. » In Canguilhem G. et al. *Anatomie d'un épistémologue : Dagognet François*. Paris : J. Vrin, 1984, p. 39.

³⁵ « Une théorie n'est qu'un résumé d'intrigue ». In Veyne P. *Comment on écrit l'histoire, suivi de Foucault révolutionne l'histoire*. Paris : Éditions du Seuil. Comment on écrit l'histoire (première publication 1971) et Foucault révolutionne l'histoire (première publication 1978). 1979, p. 82.

Introduction générale

indépendante des opinions particulières des Philosophes, & des systèmes des Physiciens sur la vraie cause de la pesanteur .»³⁶

4) Le défi théorique et expérimental d'une œuvre

Le *De motu animalium* constitue une sorte de synthèse du savoir biologique et mécanique des études des prédécesseurs ; de leurs conceptions du *De motu*³⁷. Borelli utilise dans ses écrits les découvertes et les avancées réalisées par la pensée des anciens comme pour élaborer un modèle qui appréhende les sciences du vivant. Dans l'œuvre, défile par sauts successifs, l'histoire des concepts et des méthodes des précurseurs, selon l'intérêt des démonstrations. En faisant nécessairement référence au passé, son œuvre devient collective, historique et synthétique, depuis des théories et des résultats qui s'accumulent. Les travaux antérieurs deviennent des instruments de découverte en devenir. Borelli selon une attitude en savant analytique essaye d'expliquer en dissociant le complexe par le simple, comme le dirait Louis Hourticq, sa science « descend le cours des phénomènes, de la conscience à la vie, de la vie à la mécanique »³⁸.

Borelli résout les problèmes de compréhension en recherchant le plus souvent la vérité là où se trouvent réunies les conditions positives de la vérification, pour lui : « La considération de la mathématique est à la base de la connaissance de l'esprit comme elle est à la base des sciences de la nature, et pour une même raison : l'œuvre libre et féconde de la pensée date de l'époque où la mathématique vint apporter à l'homme la véritable norme de la vérité »³⁹. Nous sommes en présence d'un exemple typique de l'évolution d'une démarche scientifique qui se spécifie et s'améliore en s'appuyant sur les progrès des connaissances. Le *De motu animalium* a suscité l'intérêt, l'enthousiasme, mais aussi la critique chez les plus grands savants lors de la mise à l'épreuve des hypothèses développées dans les propositions. Les domaines d'analyses furent multiples ; physiologiques, anatomiques, mécaniques et mathématiques générant des controverses d'idées, d'hypothèses, de concepts et de théories sur le mouvement et la locomotion animale et humaine productrices d'évolutions dans les différents secteurs d'interprétations.

³⁶ Trabaud J. *Principes sur le mouvement et l'équilibre pour servir d'introduction aux Mécaniques & à la Physique*. Paris : chez Jean Desaint & Charles Saillant Libraires, 1741. p. 18.

³⁷ Aristote, Simplicius de Cilicie, Saint Thomas d'Aquin, Agostino Nifo, Jacob Schegk, Girolamo Fabrizi d'Acquapendente, William Harvey, Pierre Petit, Thomas Willis.

³⁸ Hourticq L. *La vie des images*. Paris : Hachette, 1927, p. 231.

³⁹ Eth. Part. I, App. « Unde pro certo statuerent, Deorum judicia humanum captum longissime superare : quæ sane unica fuisset causa, ut veritas humanum genus in æternum lateret ; nisi Mathesis, quæ non circa fines sed tantum circa figurarum essentias et proprietates versatur, aliam veritatis normam hominibus ostendisset. » Édition. Van Vloten et Land, t. 1, p. 71.

Introduction générale

L'intérêt initial pour l'œuvre de Borelli sur le mouvement des animaux fut la conséquence d'une attraction naturelle pour qui se consacre à une science quand on se réfère à son histoire : la biomécanique. L'année 2008, qui correspondait au quatrième centenaire de la naissance de Borelli, offrait l'opportunité d'attirer l'attention sur sa personne, son œuvre, mais aussi une discipline en mutation. Au-delà de la figure individuelle, son œuvre permet de réfléchir sur la production et la diffusion scientifiques principalement sur la période de la fin du XVII^e siècle et tout au long du XVIII^e siècle, mais aussi sur le long terme, quand la biomécanique par la suite prendra progressivement la place du courant iatromathématique, dont Borelli se révèle le représentant le plus brillant et le plus attachant.

Le *De motu animalium*, entre autres avec ses introductions, *De vi percussionis liber* publié à Bologne en 1667, et *De motionibus naturalibus a gravitate pendentibus* imprimé à Reggio en 1670, fait partie des chefs-d'œuvre de la culture occidentale surtout pendant la période de transition entre les deux siècles, attirant les regards curieux, diversifiés, de nombreux lecteurs savants et les analyses critiques des spécialistes du vivant. L'accueil réservé à cet ouvrage au XVIII^e siècle, révèle que la nécessité d'un changement pour aborder et comprendre l'anatomie sur le plan fonctionnel était ressentie dans les esprits de nombreuses universités. Depuis son contenu et la démarche originale empruntés, cette œuvre constitue un instant privilégié d'analyses de ruptures épistémologiques en histoire des sciences tout en conservant une sorte de continuum historique puisque faisant référence sur le plan théorique à des savants du XVII^e siècle, mais aussi à ceux de l'antiquité grecque. Chez Borelli, l'analyse de la fonctionnalité anatomique s'affranchit de la méthode traditionnelle depuis la mise en application de sa formation de mathématicien et de ses tentatives à vérifier ses suppositions théoriques par l'expérience chaque fois que cela se révèle possible.

S'il est vrai de dire avec le grand poète italien, Ugo Foscolo : « *Les urnes des morts incitent les esprits forts à de grandes choses.* »⁴⁰ et s'il est sûr que l'histoire se révèle maîtresse de vie, le livre *De motu animalium* de Giovanni Alfonso Borelli représente pour les historiens et les épistémologues des sciences de la vie et plus spécifiquement de la biomécanique, une lecture passionnante et enrichissante dans de nombreux domaines scientifiques. Pour le comprendre, il incite à mieux connaître

⁴⁰ « A grandi cose il forte animo accedono, l'urne dei morti. »

Introduction générale

l'histoire de sa discipline, en rattachant les concepts et théories utilisées aujourd'hui, à leur origine. Comme Michel Blay le conçut lors de ses premières lignes introductives à *La science du mouvement de Galilée à Lagrange* : « *La science du mouvement constitue aujourd'hui, en raison du statut des rubriques cinématiques* » et « *dynamique* » *des ouvrages de physique, le chapitre préliminaire, le passage obligé pour toute étude dans le champ de la mécanique rationnelle. La constitution de cette science du mouvement a requis des efforts considérables. Comment penser mathématiquement le mouvement ? Comment élaborer les concepts de vitesse et d'accélération ? Comment construire l'algorithme de la cinématique ? Comment nouer les liens du mouvement et de la force ? Autant de questions qui occupèrent les savants pendant près de deux siècles et dont les réponses façonnèrent largement le style et le développement de la physique mathématique moderne.* »⁴¹

Il en est de même pour l'histoire de la compréhension théorique de la science de la locomotion. Les problématiques intimement liées s'entrecroisent pour mesurer et comprendre le mouvement biologique. Ces finalités suscitent l'intérêt d'une discipline spécifique et adaptée à l'entendement du vivant : la biomécanique. Cette discipline s'enracine en s'initiant dans la secte iatromathématique et iatrophysique au XVII^e siècle en Italie. Dans le cadre d'une réflexion générale sur la thématique de l'élaboration progressive d'une discipline scientifique comme la biomécanique, la question, comment écrire l'histoire ? Ou plutôt une histoire des théories de la locomotion animale, suscite cette autre question sur l'intérêt et l'utilité d'une telle démarche, pourquoi s'intéresser à une histoire des théories ?

C'est au XVII^e siècle seulement que Borelli énonce quelque lumière sur la mécanique de la locomotion des animaux. Le savant, professeur de mathématiques, transposant aux êtres vivants les lois mécaniques récemment découvertes par Galilée, montre comment l'effet des forces musculaires se partage entre la masse du corps et une autre masse à proximité d'un point d'appui. Il réduit à une grande simplicité la théorie générale de la locomotion. Son ouvrage posthume détient une grande valeur, car il représente l'effort d'assimiler et de synthétiser plusieurs disciplines scientifiques aussi étendues que l'anatomie, la physique et la mathématique afin d'expliquer expérimentalement le mouvement humain et animal. Tous ceux qui s'intéressent à l'histoire et à la philosophie des sciences, ne peuvent que le lire et s'y appesantir.

Autour d'une odysée de quelques études mécano-physiologiques de mouvements locomoteurs particuliers ; les exemples d'analyses entre autres sur les stations érigées

⁴¹ Blay M. *La science du mouvement de Galilée à Lagrange*. Paris : Éditions Belin, 2002, p. 7.

Introduction générale

bipédiques ou quadrupédiques, les modalités de propulsion verticale lors des sauts, mais aussi la marche, ainsi que le vol et brièvement le déplacement du poisson montrent comment sur une longue durée historique les travaux de Borelli étaient encore considérés aux XVIII^e et XIX^e siècles. Ces quelques cas uniquement de locomotion biologique confirment tout l'intérêt, et la reconnaissance de la méthode physico-mathématique de Borelli par ses prédécesseurs.

Avec ses tentatives plus ou moins réussies d'explications mécanistes des phénomènes vivants et ses prémices de modélisations, lors de l'élaboration des modèles de fonctionnement sur les organismes activés par les seules lois de la physique connues au XVII^e siècle, Borelli a engagé la recherche biologique sur une voie très féconde, encore existant de nos jours, celle de la physico-mécanique⁴². En effet, depuis le XVII^e siècle, les modèles mécaniques du vivant se sont perfectionnés, pour évoluer par la juxtaposition de théories issues de différentes disciplines. Les mécanismes explicatifs d'obédiences anatomiques se sont inspirés des concepts et des démarches empruntés à la chimie, à l'électricité ou à la cybernétique pour transformer leurs conceptions théoriques sur la fibre musculaire, son innervation, son contrôle et donc toute la locomotion des postures aux mouvements.

5) Une période de turbulences scientifiques : la iatromécanique

Au XVII^e siècle le corps animal est assimilable à une machine mécanique dont le fonctionnement repose sur une complexité structurale évidente. À cette période, l'anatomie représente la principale discipline de type topographique et fonctionnelle qui met en lumière le support matériel, palpable et visible, de la locomotion. Elle explique les actions par l'étude de la structure anatomique en relation avec les éléments squelettiques et musculaires. En effet, chaque fonction des corps vivants repose sur une organisation structurale responsable de ses caractères spécifiques. Chez Borelli, ses connaissances grâce à sa formation en mécanique et en mathématique ajoutent des aspects quantitatifs et systématiques à l'anatomie, depuis l'application des théories sur les leviers, les poulies, les treuils qu'il emprunte aux anciens. Autant ces machines simples aux dispositifs élémentaires et maîtrisés sur le plan théorique physico-mathématique s'appliquent avec aisance et précision sur les mouvements des os, des

⁴² Balaguer Periguell E. *La introducción del modelo físico-matemático en la medicina moderna. Análisis de la obra de G. A. Borelli. De motu animalium*. Valencia : Cátedra e Instituto de Historia de la Medicina-Facultad de Medicina ; Cuadernos Hispánicos de historia de la medicina y de la ciencia XIV seria A, monografías, 1974.

Introduction générale

articulations et des muscles, autant la maîtrise de cette démarche sur l'explication du fonctionnement physiologique des déplacements des liquides, des substances et des appareils organiques reste difficile et aléatoire. La vérification expérimentale est essentielle pour corriger ou ajuster les hypothèses et leurs explications, mais reste tributaire des outils d'observation. Au cours de l'histoire des sciences et des techniques, les explications et les théories du mouvement et de la locomotion animale ont évolué par l'intermédiaire de la maîtrise d'outils conceptuels ou techniques pour rendre visible à l'explication, ce qui n'était que supputation. Du rejet des théories sur les esprits animaux, à l'acceptation du passage des neuro-transmetteurs dans les synapses pour expliquer la transmission de l'influx nerveux, la contraction musculaire et le mouvement aujourd'hui neuro-physiologique ont suivi cette logique de la dépendance des outils. Pour une quête historique des théories de la locomotion animale, le *De motu animalium* par rapport aux connaissances scientifiques sur le mouvement des êtres vivants de la fin du XVII^e siècle représente le marqueur d'une étape très importante de cette logique de dépendance des outils conceptuels et techniques. De plus, comme le notait Alexandre Koyré, pour une période antérieure concernant l'effort de la pensée qui avait préparé la révolution galiléenne et cartésienne : « *Il n'y a rien de plus intéressant, de plus instructif, ni de plus saisissant que l'histoire de cet effort, l'histoire de la pensée humaine traitant avec obstination les mêmes obstacles, et se forgeant lentement et progressivement les instruments et les outils, c'est-à-dire les nouveaux concepts, les nouvelles méthodes de penser qui permettront enfin de les surmonter.* »⁴³

La réflexion sur les théories de la locomotion animale en relation avec l'œuvre de Borelli s'est organisée autour de la pensée iatro-physicienne dont les lois de la mécanique et leurs formules algébriques essayent d'expliquer. Comme Borelli, le biomécanicien actuel suit la rationalité cartésienne en l'aménageant et en l'étayant du mieux possible sur des expériences. Le déchiffrement historique pour accéder aux connaissances du passé, lointain et proche, est souhaitable, car il fournit son apport à une réflexion critique qui peut être philosophique et aider à l'élaboration de nouvelles perspectives⁴⁴. Savoir que : « *Borelli étudie ainsi les conditions mécaniques de la locomotion des organismes animaux, en décomposant le mouvement des membres en une série de modèles géométriques régis par les lois de la statique : il s'efforce ainsi de recomposer le mouvement avec l'inerte juxtaposé, c'est-à-dire avec une combinaison de figures géométriques structurant la res extensa [substance*

⁴³ Koyré A. *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*. Paris : Presses universitaires de France, 1966.

⁴⁴ Blay M. *Critique de l'histoire des sciences*. Paris : CNRS Editions, DL 2017.

Introduction générale

corporelle »⁴⁵ c'est déjà posséder une source de comparaisons avec les avancées des frères Eduard Friedrich et Wilhelm Eduard Weber, les recherches d'Étienne-Jules Marey, mais aussi avec d'autres auteurs plus récents notamment les travaux de McNeill Alexander entre autres. Ces recherches s'intéressent aux relations entre la physiologie énergétique et les modalités mécaniques locomotrices, pour répondre à la problématique de la compréhension de leurs optimisations, à la fois sur l'animal, l'homme, mais aussi la machine.

6) Une réponse au cheminement complexe

Cette synthèse se structure en quatre parties : une première partie retrace la genèse des théories physiologiques et mécaniques du déplacement animal et humain depuis principalement les descriptions mécaniques et les explications philosophiques du déplacement animal chez Aristote et autour de quelques œuvres qui s'ensuivent et évoquent les compromis métaphysiques, anatomiques, physiologiques et mécaniques en introduisant de nouveaux modèles théoriques appliqués à l'explication de la locomotion.

La deuxième partie plus spécifique à la vie et l'œuvre de Giovanni Alfonso Borelli souligne une transition dans la culture de l'étude de la locomotion, celle de l'élaboration d'un nouveau paradigme par l'application de modèles physico-mathématiques aux êtres vivants. À la fin du XVII^e siècle, le *De motu animalium*, œuvre d'une vie ; révèle précisément, à un moment donné, une période transitoire dans l'étude des sciences de la vie, tout comme ce fût le cas avec la parution des travaux de Galileo Galilei, ou quelques années après la mort de Borelli, en (1687) avec la publication de l'œuvre *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* d'Isaac Newton. Ces hommes avec leurs œuvres bornent les paysages scientifiques pour délimiter une période théorique et scientifique. À l'interpellation « *et si l'on appliquait les sciences mathématiques au vivant ?* » les démarches et les réponses comme de coutume avec la plupart des nouveautés théoriques furent appliquées à outrance jusqu'à montrer les limites et les incompatibilités iatomécaniciennes dans leurs abus et leurs excès. Mais il faut concevoir que les disputes concédées ont généré une vision expérimentale et rationnelle du mouvement.

La troisième partie se fonde sur la discussion de quelques postures et mouvements spécifiques décrits et analysés selon les conceptions physico-mathématiques de Borelli.

⁴⁵ Coutard J-P. *Le vivant chez Leibniz*. Paris : L'Harmattan, 2007, p. 59.

Introduction générale

Ses analyses sont récupérées, critiquées et améliorées par d'autres auteurs au cours des siècles suivants, entre autres Félix Giraud-Teulon, Étienne-Jules Marey et d'autres auteurs plus récents⁴⁶, comme pour répondre à la question que reste-t-il de l'œuvre de Borelli au XXI^e siècle ? Plusieurs modélisations et théories physiologiques et biomécaniques récentes sont présentées dans un continuum avec la démarche physico-mathématique du XVII^e appliquée à la locomotion des êtres vivants notamment l'œuvre de McNeill Alexander, certaines propositions associées sur la coévolution animale de Reichholf qui s'intéressent aux facteurs énergétiques en relation avec les théories de l'évolution locomotrice, mais aussi les travaux de Bejan sur des lois dites d'échelle.

Enfin la quatrième partie révèle les filiations théoriques et pratiques personnelle avec les auteurs précédemment évoqués et participant à une certaine histoire de la biomécanique, celle de l'étude du mouvement l'homme dans sa quête de performances physiques sportives. Mes différents exemples d'études réalisées en STAPS montrent l'importance de la connaissance historique et épistémologique des disciplines. L'haltérophilie est née de l'utilisation d'haltères dans la Grèce Antique chez les pratiquants du quintuple saut, recherchant un point d'appui virtuel dans la charge. Les transformations corporelles occasionnées par l'utilisation de ces charges chez les sauteurs ont généré leurs exploitations dans l'entraînement pour la plastique corporelle, celui de la culture physique. Finalement dans l'analyse biomécanique de l'arraché, on retrouve la puissance mécanique du saut vertical. Haltérophilie, saut vertical et culture physique sont intimement liées par exemple, par la notion de levier avec ses trois composantes résistance, puissance et appui qui interpelle l'équilibre, les centres de masse, le centre de gravité et de pression. Ces notions devenues concepts par leur complexité se retrouvent dans la locomotion en bicyclette et sa mécanique de pédalage. Le pédalier, système de rouages ou manivelles et pédales se retrouvent pour participer à un déplacement en principe de moindre d'effort, est l'occasion d'expérimentations, de créativité, d'inventivité. Équilibre, traction et poussée cycliques sur deux roues s'expriment aussi dans la locomotion en fauteuil roulant selon des logiques biomédicales. Il en est de même pour la plupart de nos activités sportives, ou la multiplicité des variables intervenant dans l'interprétation de la complexité du

⁴⁶ Dans le principal moteur de recherche de données bibliographiques de l'ensemble des domaines de spécialisation de la biologie et surtout de la médecine scientifique PubMed, le chercheur peut localiser encore plus d'une vingtaine de références directes aux travaux de Borelli.

Introduction générale

mouvement oblige à la simplicité de la modélisation pour donner du sens d'où en ce qui nous concerne les modèles sémiophysiques élaborés depuis des points et des zones critiques.

Si le titre de cette synthèse peut paraître ambitieux, l'objectif du contenu de ce travail reste modeste. Tout comme l'énonçait l'empiriste John Locke, quand il abordait son œuvre principale intitulée *Essai sur l'entendement humain* (1690) ; pour introduire le lecteur depuis une épître éclaircissant la tâche du philosophe par rapport à celle des maîtres d'œuvre de la science de l'époque représentée par Boyle, Sydenham, Huygens et Newton et bien d'autres : « *C'est assez d'ambition que d'être employé comme manœuvre à libérer quelque peu le terrain, et à supprimer une partie des débris qui entravent la voie du savoir* »⁴⁷. En effet, le travail accompli reste encore qu'une introduction à l'œuvre de Borelli et à l'histoire des théories de la locomotion, mais incite à rompre avec l'oubli dans l'histoire des sciences de certains précurseurs fondateurs qui montrent par la réactualisation de leurs travaux que : « *La science a pourtant bien une histoire, sans laquelle on ne saurait comprendre en profondeur les mutations de nos sociétés modernes.* »⁴⁸ Modestie aussi quant à savoir que les « *découvertes qui ont immortalisé leurs auteurs, avaient été préparées par les travaux des siècles précédents, souvent même amenées à leur maturité, au point de ne demander plus qu'un pas à faire* »⁴⁹.

⁴⁷ Locke J. *An essay concerning Human Understanding*. Oxford: Editeur P. H. Nidditch, Clarendon Press, 1975, p. 10.

⁴⁸ Ronan C. *Histoire mondiale des sciences*. Paris : Editions du Seuil, 1988, page de couverture.

⁴⁹ D'alembert J. *Discours préliminaire de l'Encyclopédie par D'Alembert*. Paris : Bureaux de la publication, troisième édition, 1866, p. 49.

Partie I. Observations
physiologiques et
mécaniques du
mouvement : autour de la
pensée d'ARISTOTE et de
quelques anciens

Introduction (1)

« *L'histoire de l'homme est une histoire tout à fait étonnante. Or, lorsque l'on découvre une histoire étonnante, on a envie de la raconter* »⁵⁰ : notre planète s'est formée il y a 4,6 milliards d'années. Il faudra un peu plus d'un milliard d'années pour que les premières formes de vie apparaissent. Pendant les 2,5 milliards d'années suivantes, la vie se développe, lentement mais sûrement. Lorsque le sexe et la diversité apparaissent, le développement des espèces s'accélère. La naissance des vertébrés (500 millions d'années), puis la généralisation des mammifères (200 millions d'années) et enfin l'apparition des premiers primates (70 millions d'années) accentuent ce processus. Le développement du cerveau fera la différence entre les primates, dont l'homme et les autres vertébrés aux nombreuses similitudes. En fait : « *À l'échelle du cosmos, l'histoire humaine n'a pas plus que quelques secondes [...] Prenez l'obélisque de la concorde et considérez que sa hauteur représente l'histoire de la terre, depuis le cristallin jusqu'à l'époque actuelle. Posez à présent au sommet de l'obélisque une pièce de monnaie : vous obtenez le quaternaire. Si vous couronnez le tout d'une mince feuille de papier à cigarette, vous avez l'histoire de l'humanité.* »⁵¹

Lorsque l'on ouvre les yeux sur l'immense quantité d'animaux qui peuplent la surface du globe, l'on se heurte au premier abord aux différences énormes, presque infinies, que présentent entre eux, un homme, un poisson, une araignée, un oiseau auquel rien ne paraît commun pour un observateur superficiel. Mais après un examen de ces êtres divers, l'observateur ne tarde pas à se convaincre que malgré ces différences, il existe un certain nombre de caractères communs chez chacun d'eux, qui se reproduisent sans exception chez tous les autres animaux. C'est avec cette idée d'un ancêtre commun que Charles Robert Darwin rédige ses théories sur l'évolution des espèces vivantes et sur la sélection naturelle. Ses conceptions expliquent comment les espèces évoluent et se transforment avec le temps. Certaines de ces modifications correspondent par la disposition matérielle du corps à une étude anatomique (la forme du fémur et son articulation avec le bassin ainsi que la position du trou occipital, ou foramen magnum renseignent sur la posture de l'animal étudié). Les autres se rapportent aux phénomènes que représentent ces mêmes corps pendant la durée de vie, appartiennent à la recherche physiologique, la science qui traite des actes et des propriétés des êtres vivants (grâce

⁵⁰ Coppens Y. *L'odyssée de l'espèce*. Paris : éditions EPA-Hachette-Livre, 2003, p. 8.

⁵¹ Monod T. *Révérance à la vie*. Paris : éditions Grasset & Fasquelle, 1999, p. 94.

Partie I. Introduction

aux progrès de la biologie moléculaire, il est devenu possible d'extraire et d'amplifier les éventuelles molécules d'ADN contenues dans les restes de fossiles).

Finalement, deux sciences, celle d'un visible matérialisé et testé, l'autre longtemps fondée sur des suppositions inaccessibles à la vérification expérimentale. Mais « *la science du corps humain [comme celui des animaux] est aussi épineuse qu'elle est intéressante : elle demande un travail désagréable, dont la plupart des hommes ne sauraient souffrir que la représentation ; la mémoire la plus heureuse est toujours surchargée du nombre prodigieux des parties, de leurs différences, de leurs situations & de leurs rapports* »⁵² tout comme la physiologie « *science qui traite les phénomènes des êtres vivants, et qui cherche les lois et les conditions de ces phénomènes dans l'état de la santé* »⁵³ se révèle difficile pour représenter la science de la vie.

De tous les phénomènes de la nature, la vie est à la fois celui qui nous fascine le plus et celui qui nous concerne le plus directement dans une quête pour chercher à la prolonger le plus longtemps et le mieux possible. Les hommes se sont attachés à étudier le monde vivant, à le comprendre et à l'utiliser à leur profit. Le plus apparent des caractères de la vie, son expression dans le mouvement se manifeste dans toutes les fonctions en étant parfois l'essence de plusieurs d'entre elles. La manifestation la plus évidente du mouvement chez l'homme et les diverses espèces animales est assurément la locomotion⁵⁴. On se meut pour vivre et montrer que l'on vit. La locomotion est un acte moteur par lequel, suivant ses aptitudes, chaque être se transporte sur terre, dans l'eau, ou à travers les airs. C'est aussi dans la locomotion qu'il convient d'étudier le mouvement, car il s'y observe avec les modalités d'animations les plus variées.

Le mouvement exprime l'état d'un corps obéissant à l'action de forces ou d'impulsions qui le sollicitent, les actions vitales de la nature restent un secret difficilement pénétrable chez les animaux. La condition essentielle de la production des mouvements chez les animaux est restée longtemps expliquée principalement par la présence, dans leurs organismes de fibres musculaires et de leviers osseux pour donner de la force, de l'amplitude et de la précision aux actions. Mais le moteur de l'impulsion et du contrôle de cette motricité s'est avéré hypothétique jusqu'à ce qu'il y a peu.

⁵² Heister L., Senac J.-B. *L'anatomie d'Heister : avec des essais de physique [i.e. physique] sur l'usage des parties du corps humain & sur le mécanisme de leurs mouvements : enrichie de nouvelles figures...* Paris : Jacques Vincent, 1735, préface, p. VII.

⁵³ Berard P.-H. *Cours de physiologie, fait à la faculté de médecine de Paris*. Tome I. Paris : Labé éditeur, 1848, p. 3-4.

⁵⁴ Marey E.-J. *La Machine animale, locomotion terrestre et aérienne*. Paris : F. Alcan [4^e édition], 1886.

Partie I. Introduction

Mais comment rester insensible aux performances animales ; la puissance du galop du cheval, le saut en longueur du kangourou ou vertical du puma, la fréquence des battements des ailes de l'oiseau-mouche pour maintenir son vol statique, l'amplitude et l'aisance de l'albatros dans les airs comme celles du dauphin dans un autre milieu ? Les techniques de reptation, d'escalade, de fouissage, de migration montrent aussi leurs champions de l'endurance et de la puissance⁵⁵. Toutes ces motricités ont incité la curiosité de la compréhension de l'homme et perpétué aux avancées en anatomie, en physiologie, car les mouvements évoqués ont besoin du concours des deux grands appareils évoqués précédemment : l'un actif, représenté par le système musculaire, l'autre passif constitué par le système osseux, tous deux commandés par le système nerveux.

Si l'animal, doué de sensibilité, organisé pour s'adapter à tout ce qui l'entoure, était condamné à l'immobilité, sa vie évoluerait dans une perspective de souffrance. Il serait incapable de s'approcher des éléments susceptibles de lui causer des sensations, et mis dans l'impossibilité de fuir les prédateurs ou autres, forcé à subir, sans réaction, toutes les influences étrangères à son être. De plus, il se trouverait dans l'incapacité de se nourrir, de se reproduire, puisque l'accomplissement des fonctions nutritives et génératrices exige des déplacements plus ou moins étendus. La faculté de se mouvoir se révèle indispensable à l'animal ; aussi, existe-t-elle, sans exception, même dans les rangs inférieurs à l'échelle zoologique ! Même le polype⁵⁶, attaché à la masse calcaire qui le protège et l'enveloppe, meut son corps et ses bras pour saisir sa proie. Les facultés perceptives et sensitives des êtres vivants seraient un non-sens si elles ne coexistaient avec la faculté motrice ; l'une commande, l'autre obéit. D'un côté, les sens, qui dirigent, mais impuissants à eux seuls, de l'autre la motricité non régie par la sensibilité s'exerce sans mesure et sans but, faisant de l'organisme une machine sans régulateur.

L'étude de la locomotion se révèle un processus difficile à analyser, d'une part du fait de la multiplicité des composants organiques intervenant hiérarchiquement dans l'organisation du mouvement : os, muscles, nerfs, ligaments, tendons, articulations, d'autre part à cause de l'étendue des modes différents de déplacements : les marches, les sauts, les courses, les nages, les vols et bien d'autres modes de déplacements montrent toute la complexité des possibilités que l'évolution des êtres a engendrée.

⁵⁵ Reichholf J.-H. *Mouvement animal et évolution : courir, voler, nager, sauter*. Paris : Flammarion, 1994.

⁵⁶ Animal de l'embranchement des cœlentérés constitué d'un tube et d'une bouche garnie de tentacules.

Partie I. Introduction

Ensuite, la biologie bien que son nom soit récent se révèle une des sciences les plus anciennes sur l'étude des êtres vivants. En effet, étymologiquement « *discours sur la vie* » combien d'auteurs, naturalistes savants et philosophes ont rédigé de véritables traités sur la vie en étudiant les êtres vivants. L'utilisation anachronique des substantifs « *biologistes* » et « *biologie* » semble parfois, mieux adaptée pour qualifier leurs activités que « *physiologie* » et « *physiologistes* ». Effectuer des recherches historiques sur les théories de la locomotion animale c'est indirectement évoquer l'histoire de la biologie et ses divisions qui sont si nombreuses qu'on les élève souvent, sous le nom de sciences biologiques, au rang de disciplines particulières aujourd'hui : morphologie, anatomie comparée, physiologie, embryologie, étiologie, paléontologie... Les difficultés se présentent majeures par le nombre et l'ampleur des subdivisions dans l'étude des théories locomotrices ou la synthèse finalement reste globale malgré la durée de l'étude.

Comme le notait Louis Auguste Segond en 1852, dans *l'Histoire et systématisation générale de la biologie* : « *L'histoire d'une science ne peut être faite que par ceux qui en ont conçu l'ensemble, et qui possèdent d'ailleurs sur l'ensemble du passé humain une saine théorie. [...] Que l'on étudie les phénomènes de la cosmologie ou de la biologie, on y voit la démonstration constante de cette loi : l'esprit humain, toujours et partout, a commencé par concevoir les phénomènes comme assujettis à des volontés ; puis les êtres de raison ont pris la place des êtres surnaturels, et enfin, dieux et entités, tout à fait place à la notion de loi.* »⁵⁷ Plusieurs notions importantes apparaissent dans cette citation, d'une part, la nécessité d'une vision d'ensemble pour prendre conscience de l'évolution de l'histoire d'une science et d'autre part la référence à une théorie pour structurer ses étapes. La référence au positivisme d'Auguste Comte faisant foi à cette époque pour interpréter rationnellement le passé de l'humanité, évoque une histoire qui passe par trois états différents : un état théologique ou fictif, un état métaphysique ou abstrait et un état scientifique ou positif. Cette classification s'applique souvent au cheminement d'une idée, en concept puis en théorie. Les idées émergent dans un continuum historique et peuvent accéder selon leurs statuts de cohérence à une rupture épistémologique en suivant ces trois étapes.

Par exemple, l'évolution des idées concernant les esprits animaux, mélange de manifestations d'imagination et de connaissances anatomiques et physiologiques dans l'explication de l'initiation du mouvement, a progressé jusqu'aux théories de suc

⁵⁷ Segond L. *Histoire et systématisation générale de la biologie*. Paris : JB Baillièrè, 1851, avant propos p. VI et VII.

Partie I. Introduction

nerveux puis d'influx nerveux. De même, l'étude étymologique des mots « *âme* » et « *esprits* » désignent primitivement et au sens propre, une particularité de l'acte respiratoire, mais métaphoriquement et au sens figuré, les auteurs les ont appliqués à la vie, pour exprimer l'idée de nécessité de respirer pour vivre. Initialement, le mouvement se rattache à celui de l'acte respiratoire, pour désigner qu'un être vivant peut déplacer une partie de son corps et tendre selon ses possibilités à un changement de lieu par la locomotion.

L'histoire de la compréhension des facteurs locomoteurs et de l'élaboration des théories explicatives sous-jacentes suit cette logique, où la très longue période historique accordant toute sa considération à des notions et des concepts subtils d'âme et d'esprit a fait place après une phase d'hésitation théologique et métaphysique à une suivante plus pragmatique mécaniste rationnelle et expérimentale après des phases multiples de controverses et d'hésitations. Suivant Marc Bloc, « *Le temps véritable est par nature, un continu. Il est aussi perpétuel changement. De l'antithèse de ces deux attributs viennent les grands problèmes de la recherche historique* »⁵⁸ d'où la notion de structuration historique par périodes et étapes selon des prédominances de faits et d'auteurs majeurs pour établir des repères de tendances.

Cette première partie, en trois chapitres, évoque, tout en effleurant l'analyse, les conceptions initiales « *de l'âme et des esprits en acte* » comme sources explicatives de la locomotion jusqu'à la genèse des premières théories physiologiques et mécaniques. Selon une chronologie historique lentement et progressive, les représentations puis les hypothèses explicatives du mouvement chez les êtres vivants ont évolué vers une rationalité expérimentée. L'âme et les esprits, sources d'explications et d'interprétations de la cause du mouvement des êtres vivants, se sont vus supplantés dans le raisonnement par des théories matérialistes anatomiques, mécaniques puis physiologiques. Les auteurs savants et philosophes de cette mutation lente se dévoilent par leurs raisonnements élaborés sur des concepts et des théories actualisés selon les avancées scientifiques de leurs époques, pour répondre à la problématique : quelle est la force ou principe vital qui conduit au mouvement et par quels biais ?

⁵⁸ Bloch M. *Apologie pour l'histoire ou métier d'historien*. Paris : Armand Colin, 1974 [1949], p. 25.

Chapitre 1. Les premières représentations de la vie en mouvement

1) Les peintures rupestres et hiéroglyphiques du déplacement animal

Depuis son origine, le dessin sert à communiquer sur les objets et les phénomènes de la nature. Moins fugitif que la parole, plus universel que l'écriture, le dessin entre autres, a toujours été pour l'homme un puissant moyen d'expression, de transmission et concrétisation de pensée. C'est lui qui nous révèle la personnalité de nos plus lointains ancêtres, grâce aux magnifiques silhouettes d'animaux gravées à la pointe du silex sur les parois des cavernes préhistoriques. Il s'applique à reproduire l'image des animaux, les uns consacrés à la religion, les autres simples compagnons de l'homme ou servant à ses fêtes et ses plaisirs. C'est encore lui qui nous rapproche des plus fécondes civilisations antiques, avec les hiéroglyphes égyptiens, les décorations familières des poteries grecques, les hiératiques mosaïques byzantines. C'est lui par le Moyen Âge, la Renaissance, les XVII^e, XVIII^e, XIX^e siècles qui transmet, intacts, les riches messages des peintres animaliers.

On trouve déjà à l'aube de l'humanité (30 000 ans avant notre ère), des peintures rupestres qui témoignent le souci de représenter les animaux en mouvement comme pour incruster et tracer les preuves d'une existence^{59,60}. Les tracés des grottes d'Altamira, découverts en 1879, ceux de Lascaux (1940)⁶¹, de Cosquer (1991), de Chauvet (1995) et bien d'autres évoquent les animaux et les peuples qui vivaient dans ces temps préhistoriques. Ils nous informent que certaines espèces d'animaux étaient présentes dans telle ou telle région⁶². La représentation des mouvements désordonnés des vaches, des chevaux, des taureaux, sur les parois de la salle des taureaux de Lascaux⁶³ datée au carbone pour plus de 15 000 ans surprend et bouleverse les conceptions autant par les techniques que par l'animation du bestiaire. De même, les parois humides de la grotte

⁵⁹ Monod T. *Gravures, peintures et inscriptions rupestres*. Paris : Larose, 1938.

⁶⁰ Bandi H.-G. *L'Âge de pierre : quarante millénaires d'art pariétal*. Paris : A. Michel, 1960.

⁶¹ Aujoulat N. *Lascaux : le geste, l'espace et le temps*. Paris : Seuil, 2004.

⁶² Clottes J. *Passion préhistoire*. Paris : la Maison des roches, 2003.

⁶³ Bataille G. *La peinture préhistorique : Lascaux ou : la naissance de l'art*. Genève : Skira, 1955. « Il faut le dire : les peintures de Lascaux sont mouvantes. Elles ne se présentent pas comme des surfaces planes dont on aurait une vision parfaite en se plaçant face à elles, à deux ou trois mètres de distance. Les artistes de la grotte ont tiré un parti prodigieux du relief et des aspérités des parois, tout comme de la perspective des salles. » (Préface)

Partie I. Chapitre 1. Les premières représentations de la vie en mouvement

Cosquer où se déplacent chevaux, bisons, bouquetins, chamois, félins et autres, ponctuent et accentuent ces paysages de locomotion animale⁶⁴.



*Figure 2. La salle des taureaux dans la grotte de Lascaux.*⁶⁵

Attestés dès la fin du IV^e millénaire av. J.-C, les hiéroglyphes⁶⁶ gravés sur les monuments de l'ancienne Égypte décrivent, sous différents aspects, l'image exacte et facilement reconnaissable d'une foule d'animaux. En Égypte pharaonique, les papyrus et les inscriptions parfois antérieurs aux récits bibliques évoquent d'étonnantes préfigurations, démontrant que l'anatomie et la médecine étaient mieux connues que partout ailleurs. Les anciens Égyptiens et les Hébreux, peuples pasteurs, puis laboureurs laissèrent la liste des animaux domestiques qu'ils possédaient. Les momies de quelques-uns de ces animaux, conservées dans les hypogées ou cavités souterraines de la vallée du Nil, témoignent également à leur manière, de l'importance attachée depuis très longtemps à la connaissance des animaux. Leur religion prescrivait l'embaumement non seulement des animaux sacrés, mais aussi des cadavres humains et des animaux autres que ceux des espèces divinisées. C'est de cette activité d'équarrissage obligatoire selon les conventions religieuses du moment que les médecins et les prêtres devaient acquérir des connaissances sur la structure et la localisation spécifiques des viscères du thorax et de l'abdomen, mais aussi de la composition des muscles, des membranes, des éléments osseux et cartilagineux. Chez le peuple égyptien divisé en castes, le prêtre possède cette connaissance anatomique et physiologique prérogative à son statut souvent d'unique savant philosophe lettré et médecin.

Ce qu'était la zoologie à cette période lointaine reste difficile à définir avec précision si ce n'est parfois par déduction approximative. La zoologie devait son

⁶⁴ Clottes J., Courtin J. *La grotte Cosquer : peintures et gravures de la caverne engloutie*. Paris : Seuil, 1994.

⁶⁵ Photographies extraites du site du ministère de la Culture <http://www.culture.gouv.fr/fr/arcnat/lascaux/fr/>

⁶⁶ Healey JF. *The Early Alphabet : Reading the Past*. Londres : British Museum Press, 1996.

Partie I. Chapitre 1. Les premières représentations de la vie en mouvement

évolution à l'usage d'élever dans les temples, les animaux sacrés, et de les peindre ou de les sculpter sur quelques parties de ces temples, catacombes ou sur d'autres monuments.

L'art égyptien, en dépit de l'absence de perspective, était très réaliste, les artistes disposaient d'une connaissance approximative de l'anatomie, mais un sens perfectionniste du détail, surtout pour les dessins d'animaux. Les chevaux figurés sur les murs des temples et des tombes conservent les plus anciennes images du cheval à l'époque historique, mais celui-ci occupe une petite place dans l'art de l'Égypte⁶⁷. La fixité de ses conventions, la fidélité à ses rites et coutumes, la réticence aux changements en sont la conséquence. En revanche, chez d'autres peuples, il en fut autrement, notamment, dans le berceau mésopotamien de l'écriture⁶⁸, le peuple Chaldéo-Assyrien représente le cheval selon des configurations multiples : attelé ou monté pour la chasse et le combat (Musée du Louvre et British Museum).

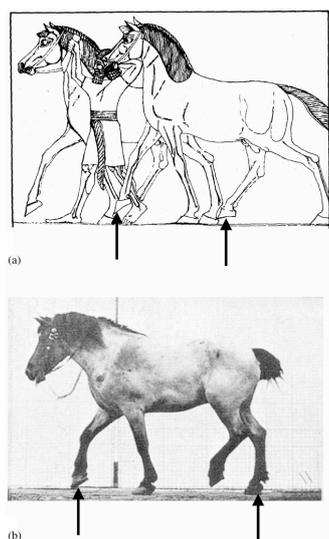


Figure 3. Un artiste décrit la marche d'un cheval (av. J.-C.), il indique un modèle incorrect du mouvement des membres. Dans le schéma, les membres ipsilatéraux du cheval sont simultanément en suspension ou au sol pendant les phases. L'œil de l'artiste n'a pas pu échantillonner à une fréquence suffisante pour observer le modèle correct du mouvement des membres. Comme illustrés en (B) depuis les techniques photographiques développées par Muybridge, les membres contre latéraux du cheval sont simultanément oscillants ou lestés pendant les phases (Extrait de Dagg, 1977).⁶⁹

⁶⁷ Rommelaere C. *Les chevaux du Nouvel Empire égyptien. Origines, races, harnachement*. Bruxelles : Connaissance de l'Égypte ancienne, 1991.

⁶⁸ Kramer S.N. *L'histoire commence à Sumer*. Paris : Editions Flammarion, 1993.

⁶⁹ Dagg A. I. *Running, walking and jumping*. In Cappozzo A., Marchetti M., Tosi, V. (Eds.), *Biocomotion: A Century of Research Using Moving Pictures*. Rome : Promograph, 1977, p. 19.

2) L'observation de la vie dans la dissection des corps

Si l'Égypte est incontestablement la première civilisation à avoir créé un début de médecine de compréhension des corps et de leurs pathologies, il faut se tourner vers l'Hellade⁷⁰ pour appréhender cette préoccupation. Comme le relevait Houdart en 1856, depuis son travail sur la médecine grecque depuis Esculape jusqu'à Hippocrate, qui démontre finalement que rien de convenable ne se réalise en science sans un investissement patient et progressif des générations. Il notait que « *c'est de l'école de Pythagore qu'est sortie pour la première fois l'heureuse idée, qu'il fallait, afin de connaître les fonctions animales, étudier la nature des instruments qui les exécutent. Et cette idée, devenue le véritable fondement de la médecine, Chalcidius en attribue l'honneur à Alcméon, quand il dit que ce philosophe osa, le premier parmi les Grecs, se livrer à l'art des dissections, et de plus écrivit beaucoup de belles choses sur la structure de l'œil* »⁷¹.

Agissant vers 500 av. J.-C., Alcméon de Crotona, médecin physiologiste auditeur pythagoricien, révèle déjà une conception de l'âme d'ordre divine en perpétuel mouvement dans un premier ouvrage peut-être sur la nature. Selon Théophraste, comme un messager de l'enseignement des Asclépiades, des philosophes de l'école ionienne, il distinguerait déjà les animaux des hommes par la prédisposition de ces derniers à la conscience de leurs actions, mais tout en ayant chacun des sensations. Dès l'Antiquité, on cherchait à savoir si la vie avait un principe distinct de la matière et de l'âme, ce qui donnait lieu à différentes hypothèses.

Neuf siècles av.-J.-C., Homère, en est un représentant par le témoignage de ses écrits dans l'Iliade et l'Odyssée, « *fable et histoire, hypothèse et tradition chimère et science, composent Homère.* »⁷². Paul-Joseph Barthez, évoque à son sujet qu'« *il est un grand nombre de faits relatifs à l'Histoire Naturelle de l'Homme et des Animaux, qui n'ont point été observés par les Auteurs qui ont écrit sur cette Science ; et qu'on trouve indiqués par les grands Poètes, ou dans la Langue de certains Peuples ; à qui leur genre de vie, et la nature des lieux qu'ils habitent n'ont présenté qu'un petit nombre d'objets. Les grands Poètes, et surtout Homère, qui est certainement le premier de tous ; dans les peintures qu'ils ont faites des mouvements de l'Homme et des Animaux, ont marqué plusieurs traits, qui n'ont été bien saisis par aucun des Commentateurs ; mais qui frappent*

⁷⁰ Les provinces centrales de la Grèce ancienne, par opposition au Péloponnèse, et, plus tard, à la Grèce dans son ensemble.

⁷¹ Houdart M.-S. *Histoire de la médecine grecque depuis Esculape jusqu'à Hippocrate exclusivement*. Paris : J.-B. Baillière, 1856, p. 215.

⁷² Hugo V. *William Shakespeare*. Paris : Librairie internationale, 1864, p. 60.

d'un sentiment de vérité singulière, les yeux exercés d'un Physiologiste, et l'excitent à en rechercher les causes »⁷³.

3) Les phénomènes de la vie selon la théorie du pneuma

Mais la philosophie, qui émerge au VI^e siècle avant notre ère en tant qu'explication du monde et de l'ordre des choses susceptibles, remplacera progressivement les anciennes explications mythiques⁷⁴. C'est bien en Grèce qu'est né l'esprit scientifique, sur le terreau mythologique, les tentatives d'explication de l'univers essayent d'éliminer l'intervention du « surnaturel » dans l'énigme posée par l'existence du monde. Dès le septième siècle avant notre ère, les philosophes observateurs de la nature tentent de ramener à des causes physiques les phénomènes biologiques. C'est le début des disciplines scientifiques et philosophiques, avec les premiers « *physiciens* », c'est-à-dire scrutateurs de la nature. Les écrits d'Hérodote, sont ceux où l'on trouve consignés, les premiers faits positifs d'histoire naturelle.

Les traités d'Hippocrate et de Ctésias de Cnide recueillent l'expérience acquise par les Asclépiades pendant plusieurs siècles, pour se résumer dans la collection connue sous le nom d'œuvres d'Hippocrate. Les connaissances sont basées principalement sur l'observation et les explications sur la notion de nature « *physis* », aucune dissection n'est réalisée sauf celle des animaux. La maladie se comprend par un déséquilibre, c'est-à-dire la prédominance d'un élément, et le médecin se charge de rétablir l'équilibre en ajustant les éléments contraires.

Au IV^e siècle av. J.-C, l'école hippocratique conçoit des hypothèses explicatives sur la vie et son mouvement. La théorie du pneuma, identifiée au souffle de vie, ébauche de ce principe la source logique de tous les phénomènes vitaux en les activant, mais aussi en les gérant. Hippocrate, et plus tard Galien, prête l'harmonie des phénomènes organiques à une sorte de principe divin. Aristote semble avoir considéré l'âme, qu'il nomme entéléchie, comme le résumé des propriétés de la vie. L'âme est l'entéléchie première d'un corps naturel doué d'organes et ayant la vie en puissance (Aristote, *De l'âme*, II, I, § 5). Il pensait que les esprits animaux, poussés du cœur par les artères jusque dans les extrémités nerveuses, arrivaient aux articulations pour déplacer les os, en les attirant dans la flexion et en les poussant dans le cas de l'extension. Mais pour

⁷³ Barthez P.-J. *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*. Carcassonne : imprimerie de Pierre Polere, 1798.

⁷⁴ Cuvier G., Saint-Agy T. M. *Histoire des sciences naturelles : depuis leur origine jusqu'à nos jours, chez tous les peuples connus*. [Tome 1]. Paris : Bechet, 1831 p. 84 - 85.

expliquer comment l'action d'un corps si ténu pouvait produire des effets si puissants, il supposait que notre système locomoteur était construit de telle sorte qu'à un petit mouvement produit dans le point où s'appliquait le spiritus agissant, devait nécessairement correspondre un mouvement plus grand dans un point éloigné de la machine. Ainsi, [disait-il] le pilote, au moyen d'un léger effort, imprime au gouvernail un petit mouvement qui en produit un très grand sur toute la masse du vaisseau. Selon lui, tout mouvement dans une partie, impliquait le repos dans une autre.

4) La vie entre matérialisme et spiritualisme

La vie est un mot que la science n'a pas encore dépouillé de tous ses mystères. Elle évoque des puissances inconnues qui échappent à toute maîtrise, des forces que l'on peut ralentir jusqu'à les annihiler, mais sans pouvoir les reproduire. Dans la Grèce antique, on désignait cette force de vie, dans les êtres vivants, comme la puissance d'un « souffle » impalpable et inaccessible. La présence physique de ce souffle de vie, synonyme de l'existence d'un mouvement respiratoire, s'est résumée en une motion plus subtile et imperceptible, l'« âme ». On pourrait penser que le corps s'est imposé dans toute sa présence et sa matérialité avant que l'âme ne fût découverte et nommée, cependant ce ne fût pas le cas. En effet, la signification du mot *soma* est particulièrement significative chez Homère en désignant le cadavre. Alors que les présocratiques offrent dans leur explication du monde et dans leur représentation de l'homme une place essentielle au jeu des oppositions, on ne trouve pas chez eux « *l'opposition de la matière et de l'esprit* ».

La découverte de l'âme qui au cours de l'histoire sera opposée au corps et représentera le facteur essentiel de sa détermination, ne s'est pas faite subitement. Chez Homère, l'âme est double. La psyché désigne le souffle qui disparaît avec la vie. Le thumos évoque un élan : aussi bien, celui du sang qui gicle, que celui de l'esprit qui s'élance. Avant le VI^e siècle, psyché et thumos ne font qu'un. Selon Platon, le monde est composé, à l'instar des humains, d'un corps et d'une âme, œuvres, l'un et l'autre d'un démiurge, c'est-à-dire d'un dieu créateur. L'âme du monde a reçu prééminence sur le corps. Mais le corps, lui, a été doté d'une fonction essentielle : la capacité à se mouvoir. Parmi les mouvements possibles, le meilleur est celui que le corps se donne à lui-même. Pour Aristote, « *il appartiendra au naturaliste de parler de l'âme et d'en avoir la science, et sinon de toute âme, du moins de ce qui fait l'animal, ce qu'il est ; le naturaliste doit connaître ce qu'est l'âme ou cette partie spéciale de l'âme, et tout ce qui accompagne son essence, d'autant plus, que nature se dit en deux sens : la matière et la substance. C'est cette dernière qui joue le rôle de moteur et de fin.*

Partie I. Chapitre 1. Les premières représentations de la vie en mouvement

C'est cela qu'est l'âme de l'animal, ou tout entière, ou une partie d'elle-même. Ainsi, il faut, dans l'étude de la nature, insister davantage sur l'âme que sur la matière, dans la mesure précisément selon laquelle c'est plutôt par l'âme que la matière est nature, que l'inverse ; en effet, le bois n'est lit et trépied, que parce qu'il est cela en puissance. »⁷⁵ Dans ce court texte, Aristote évoque l'importance de l'âme au regard de la matière corporelle, comme principe majeur de début et de fin de mouvement. La substance et la matière se reconnaissent secondaires et sous l'emprise de l'âme. Pour cela, le naturaliste s'y réfère en priorité, et la conçoit comme fondement de toute explication de la motricité.

La vie résume dans son essence une multitude de phénomènes complexes qui se manifestent exclusivement chez les êtres organisés. Son immatérialité l'assimile à l'état d'une flamme qui se consume pour maintenir l'état d'équilibre de son milieu interne. Ses paramètres physiologiques spécifiques s'adaptent aux contraintes du milieu perpétuellement instables pour se réguler par homéostasie. La vie exprime un fonctionnement fragile de l'organisme, une énergie en équilibre instable qui suffit de peu pour disparaître. Constance et variation sont les deux états entre lesquels oscille l'être vivant, les mêmes stabilités se retrouvent à tout moment dans les déroulements des phénomènes vitaux. Alternance entre statique et dynamique pour maintenir un niveau d'intensité physiologique normal et tolérable, entre repos et action, le mouvement reste constitutif pour assouvir des besoins.

La vie évoque l'état contraire à celui de la mort, mais aussi une situation opposée aux objets physiques inanimés. Elle suggère la présence de substances ou de forces vitales que les biologistes et les philosophes ont essayé de matérialiser depuis des siècles. Quelle que soit la philosophie du biologiste, qu'il se proclame athée ou déiste, adepte du hasard ou du déterministe, il se doit de reconnaître que l'évolution de la vie dans le monde a tendu, dès son départ, vers un psychisme continuellement élevé, qui s'est épanoui parmi les primates hominidés. Les critères de distinction des hommes et des singes se révèlent difficiles, on ne sait pas exactement comment est survenue la scission entre ces deux grandes familles les préhumains et celle des gorilles et Chimpanzés, tout en reconnaissant que nous possédons par rapport à nos plus proches parentés les bonobos ou « chimpanzés nains » quatre-vingt-dix-neuf pourcent de gènes

⁷⁵ Aristote. *Parties des animaux*. Livre I. Traduction de J-M. Le Blond. Introduction de Pierre Pellegrin. La forme et l'âme. Paris : Édition Aubier, 1945. Flammarion pour l'introduction, 1995, p. 43.

Partie I. Chapitre 1. Les premières représentations de la vie en mouvement

communs et que « *la bipédie est leur première grande innovation, complétée par un prodigieux développement de l'intelligence* »⁷⁶.

Les modes et les fonctions de déplacements de l'animal ont interpellé la curiosité de l'homme, dans un premier temps comme une problématique de survie dans un milieu très hostile ; sans doute pour mieux interpréter leurs logiques et améliorer les techniques de chasse. Dans ce rapport respectueux de survie au travers de l'animal chassé, l'homme a essayé de représenter picturalement ses sources de subsistances sans doute associées à des incantations gutturales mystiques sur les éléments de la nature. Rien n'est plus passionnant de trouver dans les fouilles archéologiques des indices qui aident à comprendre comment les anciens comprenaient le fonctionnement de leurs corps et de ceux des animaux. L'utilisation de la force musculaire a été intuitivement exploitée et augmentée par des outils passifs, inventés par nos ancêtres. Les limites inhérentes aux systèmes ostéo-musculaires humain et animal, face aux contraintes environnementales difficiles et la nécessité de se déplacer plus rapidement tout en utilisant moins d'énergie métabolique, ont stimulé l'ingéniosité humaine. Les spécimens archéologiques, les manuscrits antiques, associés aux connaissances actuelles de la physiologie et de la biomécanique permettent de comprendre, notre origine, mais aussi l'évolution de certains types de locomotions.

⁷⁶ Buchet N., Dagneaux P., Coppens Y. *L'odyssée de l'espèce*. Paris : EPA, 2003, p. 17.

Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

1) Un philosophe en quête de savoir⁷⁷

Lorsque Pierre Flourens aborde l'histoire des travaux et des idées de Buffon⁷⁸, il associe sur deux siècles d'histoire les découvertes de ce dernier aux démonstrations de Cuvier. Quand Buffon reconnaît encore au XVIII^e siècle les fondements de l'histoire naturelle dans l'œuvre d'Aristote en notant que : « *L'histoire des animaux est peut-être encore aujourd'hui ce que nous avons de mieux en ce genre. Il connaissait les Animaux peut-être mieux, & sous des vues plus générales qu'on ne les connaît aujourd'hui. Quoique les modernes aient ajouté leurs découvertes à celles des anciens, je ne crois pas que nous ayons sur l'Histoire naturelle beaucoup d'ouvrages qu'on puisse mettre au-dessus d'Aristote & de Pline.* »⁷⁹, nous sommes en présence de filiations théoriques sur la biologie dont les auteurs constituent l'histoire de l'esprit humain.

Comme le note Pierre-Louis⁸⁰, sur les 1462 pages de l'édition Bekker, 426 pages, soit presque le tiers, est consacré à des questions de biologie. Ce quantitatif évoque la place de cette science dans les préoccupations d'Aristote, en effet « *La branche des sciences de la nature à laquelle Aristote a consacré le plus d'attention est la biologie : les traités biologiques d'Aristote représentent plus du cinquième de l'ensemble de ses œuvres conservées.* »⁸¹ Les cinq années qu'il séjourne dans l'île de Lesbos sont destinées en grande partie à l'étude de la biologie et plus particulièrement des animaux. C'est à cette époque qu'Aristote tout en ajustant sa méthode de recherche qui prône l'observation systématique des faits avant toute réflexion, entame la rédaction du célèbre recueil l'*Histoire des animaux*. Au cours de cette période, Aristote rédige de nombreux traités tels : les *Parties des animaux*, en anatomie comparée et le *Mouvement des animaux*. Geoffrey Ernest Richard Lloyd note que dans cette quête, Aristote élabore sa méthode où : « *Les créatures vivantes pourraient fournir des arguments de preuves sur l'explication des rôles de la forme et de la cause finale, bien plus de témoignages que ne le feraient les objets inanimés.* »⁸²

⁷⁷ Inspiré du titre du livre de Bodeüs R. *Aristote : Une philosophie en quête de savoir*. Paris : Librairie Philosophique Vrin, 2002.

⁷⁸ Flourens P. *Buffon. Histoire de ses travaux et de ses idées*. Paris : Paulin, libraire éditeur, 1844.

⁷⁹ Buffon G.-L. *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du Cabinet du Roy*. Paris : Imprimerie royale, tome premier. 1749, p. 62.

⁸⁰ Louis P. *Les parties des animaux*. Paris : Les Belles Lettres, 1956.

⁸¹ Lloyd G. E. *Les débuts de la science grecque : de Thalès à Aristote*. Traduit de l'anglais par Jacques Brunschwing. Paris : Ed. La Découverte. 1990, p. 136.

⁸² *ibid.*

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

Il fut l'un des premiers philosophes à établir les liens entre l'observation de l'univers et le monde des êtres vivants. « Aristote composa probablement un *Traité des plantes*, et peut-être un *Traité des pierres*. Ils ne nous sont pas parvenus ; en revanche, nous avons conservé ses trois grands ouvrages de zoologie qui sont un des monuments les plus importants de la science antique : l'*Histoire des animaux* (10 livres, dont le dixième est apocryphe), vaste recueil de descriptions et d'observations ; les *Parties des animaux* (4 livres) et la *Génération des animaux* (5 livres). À cet ensemble, il faut encore rattacher les *Traités de l'Âme*, *Du Mouvement des animaux*, *De la Marche des animaux*, ainsi que des traités mineurs réunis sous l'appellation de *Petits Traités d'Histoire naturelle* »⁸³.

Les ouvrages rédigés par Aristote sont nombreux et abordent la majeure partie des composantes de la connaissance humaine que l'on peut organiser. Le plus ancien et le plus remarquable livre de zoologie que nous connaissons est l'*Histoire des animaux*, car véritable encyclopédie, il y mentionne environ quatre-cents espèces animales. Ce travail de classification influencera par la méthode et les savoirs, les autres tentatives encyclopédiques. Il faut reconnaître que ce rassemblement rigoureux de connaissances zoologiques représente une synthèse et une amélioration des résultats des connaissances collectives des périodes historiques antérieures. Plusieurs siècles après, M. de Buffon ne tarit pas d'éloges sur l'*Histoire des animaux*, qui « peut-être encore aujourd'hui ce que nous avons de mieux fait en ce genre. Il connaissait les animaux peut-être mieux, et sous des vues plus générales qu'on ne les connaît aujourd'hui. Quoique les modernes aient ajouté leurs découvertes à celles des anciens, je ne crois pas que nous ayons sur l'*Histoire naturelle* beaucoup d'ouvrages qu'on puisse mettre au-dessus d'Aristote & Pline. »⁸⁴

Chez Aristote, l'observation directe et personnelle s'impose, mais aussi le recours aux témoignages dont on n'a pas eu parfois le temps, ni les possibilités de vérifier. Il se réfère très souvent et largement à ses lectures (Alcméon de Crotoné, Empédocle d'Agrigente, Anaxagore, Démocrite, Hippocrate, Homère, Hérodote, Diogène d'Apollonie et quelques auteurs qui ne nous sont connus que par les citations du précepteur d'Alexandre) complétées la plupart du temps « par des observations personnelles et des enquêtes auprès des spécialistes des mœurs des animaux, des éleveurs, des pêcheurs et des chasseurs... Aristote ajoute le témoignage des gens d'expérience, des spécialistes, et même les leçons du sens commun. Au premier rang des spécialistes figurent naturellement les médecins... Il a

⁸³ Taton R. *La science antique et médiévale. Des origines à 1450*. [Tome 1. (Chapitre IV. Aristote et son école. Le corpus aristotélicien.) Paris : Presses Universitaires de France, 1957, p. 263.

⁸⁴ Buffon G.-L. *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du Cabinet du Roy*. [Tome I]. Paris : Imprimerie Royale, 1749, p. 62.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

sûrement beaucoup fréquenté les vétérinaires et surtout les éleveurs... a consulté également les apiculteurs et les pisciculteurs... Des bouchers et des sacrificateurs »⁸⁵.

C'est dans l'analyse et l'interprétation de ses traités biologiques que l'on peut relever les prémisses d'une démarche à la croisée de deux disciplines, celle de la physiologie et de la mécanique. Nous centrerons notre attention sur un petit traité celui de *La marche des animaux*. L'utilisation de cette méthode de pensée et d'analyse, appuyée sur les causes explicatives du mouvement a contribué à l'élaboration définitive de cette discipline⁸⁶. Basée sur des connaissances de physique mécanique et d'anatomie fonctionnelle, la genèse de la biomécanique se perçoit dans le Traité du *Mouvement des animaux*, comme dans celui plus spécifique basé sur la locomotion. C'est l'hypothèse que nous tenterons de démontrer, en référence aux causes et principes explicatifs de la locomotion animale d'Aristote. Les causes et les faits recueillis dans ces traités sont devenus des concepts d'analyse du mouvement au cours du temps.

Les traités de logique ou Organon (6)

Catégories
De l'interprétation
Premiers Analytiques (2 livres)
Seconds Analytiques (2 livres)
Réfutations sophistiques.
Topiques (8 livres)

Les traités de philosophie pratique (9)

Constitution d'Athènes
Économiques (2 livres)
Éthique à Eudème (4 livres)
Éthique à Nicomaque (10 livres)
Des Vertus et des Vices
Grande Morale (2 livres)
Poétique
Politique (8 livres)
Rhétorique (3 livres).

Les traités de philosophie théorique (15)

Physique (8 livres)
Traité De l'Âme (3 livres)
De la Génération et de la Corruption (2 livres)
Sur l'Univers
Traité du Ciel (4 livres)
Météorologiques (4 livres)
Petits Traités d'histoire naturelle
Du sens et des sensibles
De la mémoire et de la réminiscence
Du sommeil et de la veille
Des songes
De l'interprétation des songes
De la longévité et de la brièveté de la vie
De la jeunesse et de la vieillesse
De la respiration
De la vie et de la mort
Histoire des animaux (10 livres)
Des parties des animaux (4 livres)
Du Mouvement des animaux
De la marche des animaux
De la génération des animaux (5 livres)
Problèmes (38 livres)
Sur Xénophane, Méliossos et Gorgias
Métaphysique (14 livres)

Figure 4. Catalogue des Œuvres d'Aristote

⁸⁵ Lloyd G. E. *La Science grecque après Aristote*. Traduit de l'anglais par Jacques Brunschwig. Les sources de l'Histoire des Animaux. Paris : éditions La Découverte. 1990, p. 34-44.

⁸⁶ Allard P., Bianchi J.-P. *Biomécanique*. [Chapitre 1. Une histoire ancienne]. Paris : Presses Universitaires de France, 1999.

1. La valeur de l'observation

Comme le souligne René Taton dans le début de la partie III, intitulée Histoire Naturelle, du Chapitre IV, Aristote et son école : « *Bien qu'Aristote ait tiré parti d'observations antérieures dont certaines remontent aux premiers « physiologues » milésiens, [École fondée au VI^e siècle av. J. -C. et représentée par les trois philosophes de la ville ionienne de Milet, sur la côte de l'Anatolie : Thalès de Milet, Anaximandre et Anaximène.] il est tout aussi vrai de dire qu'il a fondé l'enseignement des « sciences naturelles », au sens que nous donnons aujourd'hui à ce mot, que de dire que les Pythagoriciens qu'ils ont fondé l'enseignement de la géométrie. À côté de ceux de Pythagore et d'Hippocrate, son nom peut figurer comme le symbole d'une des trois grandes créations de la science hellène : les mathématiques démonstratives, la médecine, la biologie* ». ⁸⁷ Sans être arrivé à la précision ni même à l'uniformité dans le détail, Aristote n'en est pas moins le premier qui ait conçu la science à un point de vue encyclopédique, et qui ait cherché un principe de classification complète de connaissance.

Les principales œuvres qui participent comme référence à cette classification des animaux sont : les *Parties des animaux* et les *Petits traités d'histoire naturelle*, mais aussi l'*Histoire des animaux*. Ce dernier traité est un recueil de neuf livres dans lesquels est successivement traité : l'anatomie des animaux, y compris l'homme, leurs modes de reproduction et les mœurs d'un certain nombre d'entre eux. Ils y sont regroupés en espèces et en genres, eux-mêmes distribués dans deux grandes familles, celle des animaux à sang rouge et celle des animaux non sanguins, qui correspondent aux deux groupes que l'on désignera ultérieurement comme vertébrés et invertébrés. Il s'agit là, du premier système taxonomique ordonné et raisonné. Au-delà de l'aspect et de la constitution extérieure des animaux, Aristote pose en principe l'unité fondamentale du monde vivant et reconnaît déjà les notions d'homologie structurelle et d'analogie fonctionnelle. En effet, des organes comparables par leur rôle, mais différents par leur structure sont observés dans différents groupes.

2. L'anatomie comparée

Le traité des *Parties des animaux* est un manuel d'anatomie comparée, souvent placé en tête des ouvrages biologiques d'Aristote dans les manuscrits. C'est surtout Plin l'ancien qui puisa largement dans ce traité sans d'ailleurs jamais indiquer sa source. De même, Galien dans son traité *De l'usage des parties dans le corps de l'homme*

⁸⁷ Taton R. *La science antique et médiévale. Des origines à 1450*. [Tome 1]. Paris : Presses Universitaires de France, 1957, p. 273.

suit de très près l'ouvrage d'Aristote. Le traité des *Parties des animaux* s'insère dans un ensemble dont le plan a été ordonné par Aristote lui-même, et dont nous avons conservé la trace par un passage bien connu dans le prologue des *Météorologiques*⁸⁸. Aristote utilise le terme météorologique pour décrire ce que l'on appellerait les Sciences de la Terre de façon générale et non le domaine exclusif de l'étude de l'atmosphère. Aristote pense que cette étude se montre une préparation indispensable à celle de la composition des substances dont les animaux et les plantes se continuent : « Dans des ouvrages antérieurs, nous avons traité des premiers principes de la nature, du mouvement physique dans toutes ses parties, des astres dont la marche si bien ordonnée s'accomplit dans la sphère supérieure, des éléments des corps dont nous avons indiqué le nombre, la qualité et les permutations réciproques, et enfin de la génération et de la destruction des choses considérées dans leur ensemble. [...] Après avoir parcouru tous ces sujets, nous essayerons, suivant notre méthode habituelle, de traiter des animaux et des plantes, soit en général, soit à part et en détail ; car cette étude une fois faite, nous aurons à peu près achevé la totalité des recherches que dès le début nous nous étions proposé de faire. »⁸⁹ Ce début du traité, établit d'une façon très nette qu'Aristote avait conçu un vaste programme d'études physico-biologiques sur la nature ; et que ce plan général prévoyait la rédaction de traités consacrés spécialement au domaine de la vie, associés à la physique, la physiologie, la zoologie, la botanique, avec entre autres les traités des *Parties des animaux* et de la *Génération des animaux*.

Le traité des *Parties des animaux* a pour objet après une introduction générale sur la méthode en biologie, l'étude des tissus, des organes et des membres dans toute la série animale. Pour Aristote « Toute étude intellectuelle, toute exposition méthodique, la plus humble aussi bien que la plus haute, peut être considérée sous deux faces différentes. L'une de ces faces peut s'appeler proprement la science même de la chose ; l'autre n'exige qu'une sorte d'instruction générale. »⁹⁰ Comme pour suivre cette tradition, Buffon rédigera une étude spéciale de la méthode en histoire naturelle, au début de sa zoologie et Cuvier dans l'introduction du *Règne Animal*.

⁸⁸ Selon les auteurs traduits par *Météorologiques* ou *Météorologie*. Aristote. *Les Météorologiques*. Texte établi et traduit par Jules Tricot. Paris : J. Vrin, 1941. Aristote. *Météorologiques*. Texte établi et traduit par Pierre L. Paris : Les Belles Lettres, 1982. Aristote. *Météorologie d'Aristote*. Traduit en français pour la première fois et accompagnée de notes perpétuelles avec le petit traité apocryphe du Monde. Jules Barthelemy Saint-Hilaire. Paris, librairie Philosophique de Ladrage, 1863.

⁸⁹ *ibid.*, Barthelemy Saint-Hilaire J., p. 338-339.

⁹⁰ Aristote. *Traité des parties des animaux et de la marche des animaux d'Aristote : Traduits en français pour la première fois et accompagnés de notes perpétuelles par J. Barthelemy-Saint Hilaire*. Paris : Librairie Hachette et Cie, 1885, p. 1-2.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

Ses idées exprimées entre forme et fond peuvent se résumer ainsi : dans le domaine de la vie, rien n'est expliqué tant que l'on s'en tient à la cause matérielle ; ce qui importe c'est avant tout de rendre compte de la cause finale, sans négliger pour autant l'explication mécanique, mais en subordonnant très nettement la nécessité à la finalité. La place faite dans toute la biologie d'Aristote à l'explication finaliste révèle clairement le disciple de Platon. On ne trouve nulle part chez Aristote de classification claire et définitive des animaux. On peut conclure qu'il distinguait deux grands groupes : les animaux avec du sang et ceux sans. Le premier groupe comprend : l'homme ; les quadrupèdes, les oiseaux, les poissons, les cétacés, les serpents ; le second : les coquillages, les crustacés, les céphalopodes, les insectes, les zoophytes. Cette classification tout empirique reprend, en la complétant et en la corrigeant, celle que l'on trouve déjà chez Homère⁹¹.

Avec l'ensemble de ses recherches zoologiques, Aristote a montré un soin du détail tout particulier, comme pour montrer la valeur et la puissance de l'observation en biologie. C'est peut-être pour la finesse et la justesse de ses descriptions que « pendant plus de deux mille ans, depuis le IV^e siècle av. J.-C., Aristote a joué d'un ascendant sans précédent et sans équivalent sur la science. »⁹² On peut penser note René Lefebvre qu'« en dépit des critiques qu'on a pu adresser à la qualité d'une observation parfois considérée comme piètre »⁹³, qu'il « existe une dimension empirique de la biologie d'Aristote, à cet égard assez remarquable, et que le Stagirite enracine dans le voir la science qu'il propose ».⁹⁴

L'application de principes méthodologiques pour passer en revue la totalité des données et rejeter les opinions communes, a servi pour décrire, comparer, définir et classer les animaux. Finalement, Aristote élabore une démarche à la fois d'anthropologue et de zoologue pour comprendre le biologique. Il tente de serrer au plus près la spécificité du vivant. Sa méthode est expérimentale et déductive : « Il faudra se fier aux observations plus qu'aux théories, et aux raisonnements dans la mesure où leurs conclusions s'accorderont avec les faits observés. »⁹⁵ Il s'agit d'abord, d'exclure les hypothèses délirantes et les fictions pour établir des principes rigoureux. Le mot « *principe* » est cité entre 20

⁹¹ Aristote. *Les parties des animaux. Traduction et interprétation de Pierre Louis*. Paris : Société d'édition « les belles lettres », 1956.

⁹² Lloyd G. E. *La Science grecque après Aristote*. Traduit de l'anglais par Jacques Brunschwig. Paris : Editions La Découverte, 1990.

⁹³ Joly R. La biologie d'Aristote. *Revue Philosophique*, 1968, n° 2. et Byl S. *Recherches sur les grands Traités biologiques d'Aristote*. Bruxelles : Passim, 1980.

⁹⁴ Lefebvre R. « Aristote zoologue : décrire, comparer, définir, classer ». *Archives de Philosophie*, 1998, 61, p. 33-59.

⁹⁵ Histoire des Animaux, 111, 10, 760 b 31.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

et 30 fois selon les traductions françaises proposées par Louis Pierre ou Jules Barthélemy Saint-Hilaire.

Parmi les causes qui présentent Aristote comme le précepteur de l'intelligence humaine, il faut relever le caractère encyclopédique de ses ouvrages. L'étendue des recherches d'Aristote se révèle considérable, en effet, plusieurs centaines d'espèces différentes d'animaux, dont environ cent vingt de poissons et soixante d'insectes sont cités dans ses ouvrages biologiques⁹⁶. La précision de ses descriptions nous laisse envisager la pratique de la dissection qu'il a utilisée à grande échelle, exceptée sur l'homme⁹⁷. Cela se vérifie dans l'*Histoire des animaux* où il remarque que « *les parties internes de l'homme sont pour la plupart inconnues, et de la sorte nous devons recourir aux parties d'autres animaux qui ressemblent à celles de l'homme pour les soumettre à notre examen* », ⁹⁸ Mais aussi quand il expose que : « *Chez tous les animaux, le cœur renferme des cavités. Mais chez les animaux très petits, c'est à peine si on distingue la plus grande ; chez les animaux de taille moyenne, on aperçoit aussi la seconde, et chez ceux de grande taille, les trois cavités sont visibles*² [Cette division tripartite est peut-être due à l'influence de la tradition platonicienne des trois facultés de l'âme]. La pointe du cœur étant tournée en avant, ainsi que nous l'avons indiquée plus haut, la cavité la plus grande est dans la partie droite et supérieure du cœur, la plus petite est à gauche, et la cavité de grandeur moyenne au milieu des autres : la petite et la moyenne sont beaucoup plus petites que la grande cavité. Toutes trois cependant communiquent avec le poumon, mais toutes ces communications sont invisibles à cause de la petitesse des canaux, à l'exception d'une seule³ [l'artère pulmonaire] »⁹⁹.

3. Le rôle de l'âme

Cette somme de connaissances, basée sur l'observation et l'expérimentation, qui s'étend à toutes les disciplines (biologie, astronomie, physique) lui permet d'établir une classification des êtres vivants, depuis le principe que tous les êtres vivants ont une âme, mais une âme de nature différente (âme nutritive, âme sensitive, âme appétitive et locomotrice). Seul l'homme a une âme rationnelle. La clé de tous les phénomènes de la vie (bios), c'est la psychologie de son *Traité de l'âme*. Ainsi, Aristote crée une "échelle de la Nature" qui correspond à une organisation de complexité croissante de l'âme,

⁹⁶ Pellegrin P. *La Classification des animaux chez Aristote : statut de la biologie et unité de l'aristotélisme*. Paris : Les Belles lettres, 1982.

⁹⁷ Antelme A. Anatomie. In *Encyclopédie du dix-neuvième siècle : répertoire universel des sciences, des lettres et des arts avec la biographie de tous les hommes célèbres*. Paris : au bureau de l'encyclopédie du XIX^e siècle. Sous la direction d'Ange de Saint-Priest, (1851-1859).

⁹⁸ Lloyd G. E. *Les débuts de la science grecque : de Thalès à Aristote*. Traduit de l'anglais par Jacques Brunshwig. Paris : Ed. La Découverte. 1990, p. 137.

⁹⁹ Loc. Cit. p. 137.

partant de la matière inanimée et s'élevant vers les plantes, puis les éponges, les méduses, les mollusques, et ainsi de suite jusqu'au sommet où figurent les mammifères et l'homme.

L'observation des êtres vivants et l'étude de leurs organes font méthodiquement intervenir l'analogie dans l'anatomie comparée. Elle repose sur le postulat, issu de la physique, d'une finalité, ou téléologie de la nature, selon laquelle la fonction détermine la forme de l'organe. Ce qui est commun à tous les êtres vivants comme le principe interne de leur mouvement, c'est l'âme (psyché). Elle est conçue comme la forme, c'est-à-dire comme l'acte, ou encore comme l'entéléchie, d'un corps organisé ayant la vie en puissance. L'âme n'est donc pas du même ordre que le corps : ce n'est ni un corps ni une partie du corps. Ainsi, l'âme est à l'animal (c'est-à-dire à l'être vivant) ce que la vue est à l'oeil : elle en constitue la fonction la plus achevée. Cette définition de l'âme a pour conséquence qu'il ne saurait y avoir d'âme sans corps.

Mais le corps d'un être vivant est, lui aussi, comme organisme, une forme pleinement achevée à l'égard des organes et des tissus (de la matière) dont il est composé. L'âme apparaît ainsi comme l'actualisation la plus accomplie de toute une hiérarchie de formes issues des profondeurs et des virtualités de la nature physique. Elle lui demeure donc immanente, à la manière dont la fonction d'un organe est immanente à cet organe. Les fonctions, végétative, sensitive et intellectuelle de l'âme s'étagent ainsi à partir de la puissance et du mouvement de la nature elle-même, comme une continuité de stades qui mènent insensiblement de la vie élémentaire « végétative » à la sensation, à l'imagination, à la mémoire, enfin à la pensée.

4. La diversité des causes

Il est facile avec le temps de constater que les traités biologiques d'Aristote présentent de nombreuses erreurs que les critiques ont rapidement relevées : nombre de dents chez les femmes, de côtes chez l'homme, le cerveau non irrigué par le sang, le cœur siège des sensations...

Mais, la démarche prudente et critique envers les renseignements recueillis, révèle ses talents d'observateurs. En effet, sa méthodologie fluctue, peut-être pour le meilleur, entre l'expérimentation et la déduction, avec un goût prononcé pour l'observation, qui s'élabore dans son premier travail sur la zoologie qui n'est qu'un recueil de faits rassemblés dans l'*Histoire des Animaux* : « [...] les autres traités scientifiques

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

*proprement dits, comme les Parties des Animaux, le Traité De l'âme, la Génération des Animaux, s'efforcent de trouver l'explication ».*¹⁰⁰

Pour Aristote les angles d'approches de ses différentes études, entre autres de la locomotion, sont nécessairement multiples pour se rapprocher de l'unité logique, car « *comme l'avait montré Platon avant lui, il n'y a de science et de vérité que si nous saisissons, au travers ou au-delà de la multiplicité des choses, l'unité stable qui les rend intelligibles* »¹⁰¹. Comme le souligne Pierre-Marie Morel, les traités naturalistes d'Aristote, « *témoignent à la fois d'une insatiable curiosité pour les êtres naturels et d'une volonté d'en mener l'étude à la lumière d'une physique nouvelle et puissamment organisée* »¹⁰². L'objectif essentiel d'Aristote n'est pas de décrire, mais d'expliquer, d'établir les causes, notamment formelles et finales.

En effet, les êtres naturels relèvent de quatre types de causes : 1) la cause matérielle, ou la matière, désigne ce dont une chose est faite 2) la cause formelle est la forme qui rend une chose apte à remplir sa fonction et la met ainsi en conformité avec son essence ; un œil que sa forme rendrait inapte à la vue ne serait pas un œil 3) la cause efficiente est ce par quoi la chose est produite par la mise en forme d'une matière 4) la cause finale, est si l'on peut dire ainsi sa fonction (sans la vue, qui est sa fonction, la forme de l'œil ne nous serait pas intelligible). Cause formelle et cause finale jouent ici le rôle essentiel : car la matière, sans la forme, reste une virtualité et une puissance.

Que ce soit sur le mouvement des animaux ou la spécificité de leur progression, Aristote essaye de comprendre la fonctionnalité des segments corporels dans la locomotion. Dans la question de la cause du mouvement ou plus exactement du changement¹⁰³, les recherches d'Aristote consistent à trouver la cause efficiente. Car c'est la cause efficiente qui explique que le changement puisse se produire à un moment ou à un autre.

Son raisonnement s'élabore sur des repères et des constats anatomiques « *Les hommes de haute taille marchent courbés, qu'au moment où leur épaule droite se dirige vers l'avant, la hanche gauche penche plutôt vers l'arrière, et que le milieu de leur corps se creuse et se courbe* »¹⁰⁴. Les notions d'appuis, de flexions, de repères se réfèrent à sa connaissance de la

¹⁰⁰ Aristote. *Histoire des animaux. Traduction et interprétation de Pierre Louis*. Paris : Société d'éditions Les Belles Lettres, 1964, p. 12.

¹⁰¹ Morel P.-M. *Aristote. Une philosophie de l'activité*. Paris : éditions Flammarion, 2003, p. 7.

¹⁰² Op. cit., p. 9.

¹⁰³ Gagne J. *L'aporie du mouvement - changement dans la Physique d'Aristote*. Thèse de doctorat, Institut d'études médiévales, Université de Montréal, 1967.

¹⁰⁴ Aristote. *Traité des parties des animaux et de la marche des animaux d'Aristote. Traduits en français pour la première fois et accompagnés de notes perpétuelles par J. Barthélemy-Saint Hilaire*. Paris : Librairie Hachette et Cie, 1885, Chap. VII. Paragraphe 5, p. 20.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

mécanique statique : « *On pourrait peut-être se demander comment les oiseaux se meuvent avec quatre points d'appui quand ils volent ou quand ils marchent.* »¹⁰⁵ La clarté des problèmes formulés et la démarche ingénieuse et perspicace de ses explications mériteront la considération des générations suivantes de savants : « *Ainsi donc, nous avons indiqué plus haut que s'il n'y avait pas de flexion dans les membres ou dans les omoplates et les hanches, aucun des animaux sanguins pourvus de pieds ne pourrait marcher. Nous avons dit aussi qu'il n'y aurait pas de flexion sans un point fixe, que les hommes et les oiseaux, qui sont bipèdes les uns et les autres, fléchissent en sens contraire, et que de plus les quadrupèdes plient leurs membres à l'opposé les uns des autres et à l'inverse de l'homme.* »¹⁰⁶ Aristote a devancé de deux mille ans tous les labeurs anciens ou contemporains. Son travail sert de base aux études qui ont suivi en tenant une place éminente, non pas seulement dans l'histoire de la science, mais en outre dans la science elle-même, quelques progrès qu'elle ait faits et quelques juste orgueil qu'elle puisse en concevoir.

L'étude analytique du traité de la *Marche des animaux* peut constituer un exemple démonstratif de cette démarche, car on perçoit dans le traité de la marche des animaux deux principes qui ont transformé la méthodologie de compréhension des phénomènes. D'une part, l'application des mathématiques à la compréhension des phénomènes naturels « *lorsqu'il avance, la ligne formée est une hypoténuse et elle vaut en puissance la longueur de la jambe qui reste stationnaire plus l'intervalle entre la jambe levée et le sol* »¹⁰⁷ et d'autre part l'idée d'envisager des recherches de types empiriques depuis la pratique de la dissection, comme le feront bien plus tard avec succès deux médecins anatomistes Galien et Vésale. Deux principes qui nécessitaient d'être découverts et appliqués par les Grecs puis redécouverts à la Renaissance.

L'objectif qu'Aristote cherche est essentiellement théorique, savoir pour savoir, comprendre, ajuster les problèmes à l'intelligence, telle est la fin de tous ses efforts. Comment Aristote procède-t-il pour acquérir la science qu'il souhaite ? Il est observateur et il est constructeur ; d'une manière générale, il allie et combine intimement l'étude scrupuleuse des faits et l'effort pour les rendre intelligibles. Les faits sont pour lui le point de départ, mais il ne s'y tient pas : il cherche à en extraire les vérités rationnelles qu'il croit a priori y être contenues. Il part de la vie organique pour arriver à la conscience de l'âme comme cause et conséquence. L'objectif attendu semble la

¹⁰⁵ *ibid.*, MA. Chap. X., Paragraphe 1, p. 27.

¹⁰⁶ *ibid.*, MA. Chap. XII., Paragraphe 1, p. 31.

¹⁰⁷ *ibid.*, MA. Chap. IX., Paragraphe 3, p. 25.

connaissance des choses sous la forme démonstrative, c'est-à-dire sous la forme d'une déduction où les propriétés de la chose se connaissent par son essence même. Ses dissertations philosophiques suivent en principe le raisonnement suivant : premièrement, il détermine l'objet de la recherche, afin de ne pas s'exposer aux malentendus. Deuxièmement, il énumère et apprécie les indications et les opinions existant sur la matière. Troisièmement, il recherche et examine de la manière la plus complète, les difficultés que présente la question posée. Enfin, considérant les problématiques en elles-mêmes, et utilisant dans ses raisonnements les résultats des discussions précédentes, il cherche la solution du problème dans la détermination de l'essence une et éternelle de l'objet en question. Concernant les phénomènes vitaux qui préoccupent les sciences naturelles, Aristote attribue la cause aux substances spirituelles, dont l'âme pensante est la source de la vie physiologique. Dans le *Traité de la Marche des animaux*, on constate que certaines étapes sont occultées de par la nouveauté du thème abordé : la locomotion « [...] *pour se rendre d'un lieu à un autre* [...] »¹⁰⁸ quoiqu'il essaye de raisonner sur des faits bien observés et sur des expériences, ses réponses occultent le véritable moteur du mouvement, les muscles actionnant les os.

2) Le traité de la Marche des animaux

1. L'authenticité du traité

Le traité de la *Marche des animaux*, que l'on pourrait intituler aussi de la *Locomotion des animaux*, n'est mentionné, ni dans le catalogue de Diogène Laërce (On considère cependant qu'il a dû vivre au III^e siècle apr. J.-C., quelque temps après Marc-Aurèle et Lucien de Samosate), non plus dans le traité des *Parties des animaux*, ni dans celui d'Hésychius. Malgré cet oubli des deux principaux catalogues, l'authenticité de l'étude sur la *Marche des animaux*, ou *Locomotion des Animaux*, quelle que soit la composition imparfaite, ne peut être douteuse. Partout, la pensée d'Aristote est reconnaissable dans les théories, si ce n'est dans le style qui les exprime. Cette preuve doit suffire à qui la comprend bien, en dépit de quelques défauts de rédactions ; mais à cette preuve-là, qui est déjà frappante, on peut en ajouter d'autres, qu'il ne faut pas non plus négliger.

¹⁰⁸ MA. Chap. I. Paragraphe 1, p. 12.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

Barthélemy-Saint Hilaire Jules. (1885).
Traité des parties des animaux et de la marche des
animaux d'Aristote (Tome 2).
Paris. Librairie Hachette et Cie.

Traité de la marche des animaux
(Tome II, p. 323 - 405)

Chapitre I.
Chapitre II.
Chapitre III.
Chapitre IV.
Chapitre V.
Chapitre VI.
Chapitre VII.
Chapitre VIII.
Chapitre IX.
Chapitre X.
Chapitre XI.
Chapitre XII.
Chapitre XIII.
Chapitre XIV.
Chapitre XV.
Chapitre XVI.
Chapitre XVII.
Chapitre XVIII.
Chapitre XIX.

Louis Pierre. (1973).
Marche des animaux ; Mouvement des animaux ; Index
des Traités biologiques.
Paris, Société d'Édition « Les Belles Lettres ».

Traité de la marche des animaux
(p. 12 - 41)

1. Problèmes relatifs à la locomotion.
2. Rappel de quelques principes.
3. Conditions générales de la locomotion.
4. Disposition des plantes : le haut et le bas.
Le devant et le derrière.
La droite et la gauche.
La droite est le principe du mouvement.
La droite et la gauche chez l'homme.
5. Définition du haut et du devant.
6. Principe général des mouvements.
7. Locomotion des sanguins à deux ou quatre pieds.
Locomotion des apodes.
8. Pourquoi les serpents n'ont pas de pieds.
Les pieds sont toujours en nombre pair.
9. Étude générale de la flexion.
La flexion chez les apodes.
Rôle de la flexion.
10. Conditions du vol des oiseaux.
Rôle de la queue dans le vol.
11. La station droite de l'homme.
12. Rappel de quelques points acquis.
La marche chez l'homme.
La marche des quadrupèdes.
13. Modes de flexion des différentes articulations.
14. Les membres se meuvent en diagonale.
Mouvement des pattes chez les crabes.
15. Les membres des oiseaux.
Les pattes des reptiles.
16. Les animaux à pieds multiples.
17. Marche des crabes.
Les plies.
Les palmipèdes.
18. Différences et ressemblances
entre les oiseaux et les poissons.
19. Mouvements des testacés.
Conclusion.

Figure 5. Table des matières du traité de la Marche des animaux.

D'abord, le traité de la *Marche des animaux* est très clairement indiqué, sans être nommé, dans le traité du *Mouvement des animaux*, qui débute en résumant, de la manière la plus exacte, le traité de la *Marche des animaux* : « *Tout ce qui concerne le mouvement des animaux, les modes de locomotion de chaque genre, les différences qui les séparent, les causes qui expliquent les particularités propres de chacun, tout cela a été étudié ailleurs en détail...* »¹⁰⁹. Aristote renvoie le lecteur à *l'Histoire des animaux*, mais principalement à l'ensemble du traité de la *Marche des animaux*, dont le traité du *Mouvement des animaux* constitue la suite. Il marque la différence des sujets dans l'un et dans l'autre, celui-ci très spécial, et celui-là, tout général. On ne peut se tromper ; et, bien que le nom même du traité de la Marche des animaux ne soit pas rappelé dans ce passage, le doute n'est pas possible. C'est ainsi que nous devons en juger aujourd'hui à la simple lecture, et qu'en jugeaient les commentateurs dans l'Antiquité, tels que Michel d'Éphèse.

À cette première indication tirée d'un ouvrage aristotélique, on doit en joindre deux autres, qui se trouvent dans le Traité des *Parties des animaux*, liv. IV, Ch. II, §14, et Ch. XIII, §6. Le premier de ces deux passages rappelle la théorie des jointures et des

¹⁰⁹ Aristote. *Marche des animaux. Mouvement des animaux. Index des traités biologiques. Texte établi et traduit par Pierre Louis*. Paris : société d'édition Les belles lettres, 1973, paragraphe 1, p. 52.

flexions ; le second rappelle l'organisation des serpents, qui se meuvent par la reptation. Ces deux références sont d'une parfaite exactitude.

Quant aux citations que fait le Traité même de la Marche des Animaux, elles ne sont également que deux, la première, Chap. I, §6, nomme l'Histoire de la Nature ; et sous cette appellation, qui est peut-être unique dans toute l'œuvre d'Aristote, il faut entendre l'*Histoire des Animaux*, caractérisée si précisément qu'il n'y a pas à s'y tromper un instant. La seconde citation concerne le traité *de l'âme*, et elle termine le petit traité de la Marche, Ch. XIX, §3, en annonçant les études psychologiques, dont il est en quelque sorte l'introduction et comme préambule.

Voilà tout ce que l'on peut dire de l'authenticité du Traité de la Marche des Animaux. Ces renseignements sont très courts ; mais ils suffisent, du moment que l'on peut affirmer, comme on doit le faire, que ce petit ouvrage est, pour le fond, sinon pour la forme, digne d'Aristote. C'est ce que l'on a essayé d'établir plus haut, en le comparant aux travaux qui, depuis deux siècles et particulièrement de notre temps, ont été consacrés à la même question, c'est-à-dire à la locomotion animale, marche, vol, natation, reptation, etc., dans toutes leurs nuances.

Enfin, si la doctrine du petit traité de la Marche des Animaux n'était pas d'Aristote, il resterait toujours à savoir de qui elle pourrait être ; et, de même que pour le Traité des Parties, il faut dire encore pour celui-ci qu'Aristote seul était capable de le faire et que la gloire doit exclusivement lui en rester. C'est une preuve négative, dira-t-on ; soit, mais elle n'est pas moins péremptoire.

2. Le style et la méthode de la démarche

Cette appréciation équitable n'empêche pas de reconnaître que, si la pensée est bien d'Aristote et ne peut être que de lui, la rédaction laisse à désirer « *Le style de la prose aristotélécienne sec, chargé d'ellipses et de répétitions, sans concessions pour des ornements littéraires... est un style direct, objectif et rigoureux, sans fioritures. Une prose scientifique qui essaie d'être claire et scolaire, et c'est en ce sens qu'il n'évite pas les répétitions quand il les croit nécessaires et, d'un autre côté, il élimine tout celui qui n'est pas strictement précis pour le développement logique de l'exposition, avec un langage familier...* »¹¹⁰ En effet, il y a des répétitions assez nombreuses

¹¹⁰ « El estilo de la prosa aristotélica seco, lleno de elipses y de repeticiones, sin concesiones a adornos literarios [...] Es un estilo directo, objetivo y riguroso, sin florituras. Una prosa científica que trata de ser clara y escueta, y por eso no evita las repeticiones cuando las cree necesarias y, por otro lado, elimina todo lo que no sea estrictamente preciso para el desarrollo lógico de la exposición, con un lenguaje coloquial [...] » In Aristoteles. Partes de los animales. Marcha de los animales. Movimiento de los animales. Jimenez Sanchez-Escariche E, Alonso Miguel A. Madrid: Gredos. 2000, p. 45.

et inutiles, il y a des négligences d'expressions, qui ne permettent pas toujours de bien saisir l'idée qu'elles rendent incomplètement ; enfin, on peut trouver dans la composition générale du désordre. Pour expliquer ces défauts, on peut recourir à deux hypothèses. L'une, c'est qu'Aristote n'a pas pu mettre la dernière main à ce petit ouvrage ; l'autre, que ce n'est pas lui personnellement, mais un de ses élèves, qui l'aura écrit, comme un résumé des leçons du maître. Dans l'une ou l'autre des hypothèses, le fond des pensées appartient bien à Aristote ; et c'est à cette conclusion qu'il convient de s'arrêter.

Telle qu'elle a été conservée, l'œuvre d'Aristote est d'une écriture concise et riche en formules, elle représente sans doute exclusivement l'enseignement dit « *ésotérique* », interne à l'école péripatéticienne, et non pas l'« *exotérique* », destiné à un plus large public, que dispensait oralement Aristote : d'où la difficulté, la densité et la technicité de l'expression. D'où aussi la diversité des interprétations et des lectures d'Aristote qui sont réalisées à travers le temps et les aires culturelles. Aristote se sert de la langue attique écrite de son temps. Mais la multitude d'idées nouvelles qu'il se propose d'exprimer, exercent sur la forme qu'il emploie une influence profonde.

La considération des choses dans leur individualité, la distinction précise des domaines scientifiques, l'effort pour arriver à des concepts dégagés de tout élément sensible se reflètent dans la langue et dans le style d'Aristote. De même que l'analyse logique d'Aristote ne s'arrête dans son travail que, lorsqu'elle a saisi les dernières différences, les antinomies spécifiques, de même, dans la langue d'Aristote, les synonymes apparents se distinguent et se définissent rigoureusement. Comme le signale Emile Boutroux dans la partie XXIX consacrée à Aristote écrivain : « *Pour définir les termes, Aristote avait deux moyens : déterminer scientifiquement la signification des mots traditionnels, et créer des termes nouveaux. Il a usé de ces deux méthodes, mais en faisant prédominer la première. Il part le plus souvent d'un terme usuel et, tantôt restreignant, tantôt étendant la signification de ce terme, il en fait l'expression exacte d'un concept logique. Mais, en bien des points, le langage traditionnel présentait des lacunes. Pour les combler, Aristote a créé des mots, en cherchant toutefois le plus possible un point d'appui dans la tradition elle-même. Grâce à la perfection de la terminologie qu'il a ainsi constituée, il a été le véritable fondateur de la langue scientifique universelle. En un mot, le style d'Aristote se distingue par une exacte appropriation de la forme au contenu.* »¹¹¹

¹¹¹ Boutroux E. « Aristote ». In Berthelot Marcellin (sous la direction de) *La grande encyclopédie. Inventaire raisonné des sciences, des lettres et des arts par une société de savants et de gens de lettres*. Paris : H. Lamirault et C^{ie} Éditeurs, 1885-1902, Tome III, p. 933 - 954.

3. Une vision globale du traité

Jules Barthélemy Saint-Hilaire a publié une traduction française des œuvres complètes d'Aristote, la première pour la plupart d'entre elles, qu'il fit pendant la traduction des œuvres de Platon par Victor Cousin. Les traités des *Parties des animaux* et de la *Marche des animaux*, avant leurs traductions proprement dites, contiennent une importante préface, un commentaire aussi long que la traduction qui les positionne dans l'œuvre : « *Le principal mérite du petit traité d'Aristote sur la Marche des Animaux, c'est d'être le premier en date ; il a devancé de deux mille ans la science moderne ; et quoiqu'à son tour, elle l'ait dépassé de beaucoup, c'est de lui qu'elle est sortie. Il est probable qu'au XVI^e siècle, cette étude serait née spontanément, comme tant d'autres, si les philosophes et savants grecs ne l'avaient pas eu créée dès longtemps ; mais l'initiative appartient exclusivement à l'Antiquité, et cette théorie doit compter parmi les richesses que nous lui devons. Quatre cents ans avant notre ère, ce fut une idée très neuve de prendre pour objet d'un examen scientifique la locomotion des êtres animés, et de détacher ce curieux phénomène de la zoologie.* »¹¹²

Il faut essayer de ne pas confondre, comme on l'a fait quelquefois, le traité de la *Marche des Animaux* avec le traité du *Mouvement des animaux*. Ce dernier traité fait partie des opuscules, joints ordinairement au traité de l'Âme, dont ils sont la suite, et qu'ils complètent à bien des égards. Quoique les deux traités, du *Mouvement* et de la *Marche*, soient très proches sur le plan des théories, il convient de les distinguer, car le premier s'occupe du principe du mouvement, volontaire ou involontaire, dans toute sa généralité en l'étudiant dans l'univers aussi bien que dans les êtres animés. Tandis que le second, traite exclusivement des organes et des modes particuliers que le mouvement présente à notre observation dans les diverses séries d'animaux. Une brève analyse globale (par rapport aux interprétations et commentaires détaillés, pratiquement ligne à ligne des différents auteurs de références)¹¹³ nous apprendra ce qu'est le traité de la *Marche des Animaux*, ce qu'il vaut, et aussi quelles en sont les quelques lacunes.

¹¹² Aristote. *Traité des parties des animaux et de la Marche des animaux d'Aristote traduit en français pour la première fois et accompagnés de notes perpétuelles par Jules Barthélemy Saint-Hilaire*. Tome 2. Paris : Librairie Hachette et Cie, 1885.

¹¹³ Ce commentaire fait référence à quatre travaux de traduction et d'interprétation. Principalement, la première traduction en français de Jules Barthélemy-Saint-Hilaire (1885), puis de Pierre Louis (1973) et secondairement celles qui sont en anglais d'Anthony Preus (1981) et en espagnol d'Elvira Jiménez Sánchez-Escariche et d'Almudena Alonso Miguel.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

Chapitre I.

Énumération des questions que représente l'étude de la locomotion dans les animaux ; différences des organes locomoteurs ; leur nombre variable, mais toujours pair ; l'homme, l'oiseau, le poisson ; flexions des appareils locomoteurs en sens inverse chez l'homme, chez l'oiseau, chez des quadrupèdes vivipares et ovipares ; mouvement diagonal des appareils locomoteurs ; citation de l'Histoire de la Nature ; résumé des questions à traiter.

● Pour étudier les organes dont se servent les animaux en exécutant des mouvements de locomotion, nous rechercherons **pourquoi chacun de ces organes est tel qu'il est**, et dans quelle vue il a pu être donné (p. 324) à l'animal qui l'emploie. Nous aurons également à **observer les différences** que ces organes peuvent présenter, de l'un à l'autre, dans un seul et même animal, ou relativement aux organes d'autres animaux qui appartiennent à un genre différent. ● Mais d'abord, **déterminons bien toutes les questions** dont nous aurons à nous occuper. Un premier point qu'il faut fixer, c'est le **minimum des appareils** par lesquels les animaux ont la possibilité de se mouvoir. Nous verrons (p. 325), ensuite, pourquoi tels **animaux pourvus de sang** ont reçu quatre de ces appareils, tandis que ceux qui n'ont pas de sang en ont un nombre plus grand ; ou plutôt, nous rechercherons, d'une manière toute générale, pourquoi tels animaux sont sans pieds, **pourquoi tels autres en ont deux, pourquoi d'autres en ont quatre, et pourquoi d'autres encore en ont reçu davantage**.

● Après ceci, nous aurons à nous demander pourquoi tous les animaux qui sont pourvus de pieds ont les pieds en nombre pair et pourquoi, absolument parlant, c'est toujours en un nombre pair que se (p. 326) montrent les organes de la locomotion. Une autre question qu'il faudra éclaircir comme les précédentes, c'est de savoir comment il se fait que **l'homme et l'oiseau ont deux pieds, tandis que les poissons n'en ont pas du tout** ; comment, dans l'homme et dans l'oiseau, qui sont l'un et l'autre pourvus de deux pieds, **les flexions des jambes** se font dans des sens contraires, l'homme fléchissant la jambe en un cercle convexe, tandis que l'oiseau la fléchit en un sens concave. ● Bien plus, l'homme lui-même fléchit en sens contraire ses jambes et ses bras, creusant en forme concave les bras pour les fléchir, et fléchissant le genou en une sorte de cercle convexe. Puis, nous verrons que les quadrupèdes vivipares ont des flexions qui sont opposées à celles de l'homme, et qui sont également opposées entre elles. Ainsi, ils fléchissent (p. 327) les jambes de devant, en formant une espèce de circonférence, et les jambes de derrière en les creusant. Quant aux quadrupèdes qui sont, non pas vivipares mais ovipares, ils ont une flexion particulière, qui est dirigée en un sens oblique.

● Enfin, une dernière question qu'il faudra encore nous poser, c'est celle de savoir pourquoi les **quadrupèdes se meuvent toujours en diagonale**.

● Tels sont donc tous les sujets que nous aurons à étudier, en y joignant aussi ceux qui tiennent de près à ceux-là, **afin de découvrir les causes de tous ces phénomènes**. Déjà l'Histoire de la nature nous a fait (p. 328) voir ce qu'ils sont réellement, mais maintenant il nous faut **chercher à comprendre pourquoi ils sont ce qu'ils sont**.

1. Problèmes relatifs à la locomotion.

● (p. 12) En ce qui concerne les **organes** dont les animaux se servent pour se rendre d'un lieu à un autre, il faut examiner pour quelle raison chacun d'eux est ce qu'il est, et en vue de quelle fin les animaux les possèdent ; il faut aussi étudier les différences que présentent entre eux les organes chez un seul et même animal et avec ceux des autres animaux d'un genre différent.

● Mais précisons d'abord quelles sont les **questions** à examiner. La première est de savoir avec **combien de points d'appui** au minimum les animaux se meuvent, on verra ensuite pourquoi les **animaux sanguins** en possèdent quatre, tandis que les **non-sanguins** en ont davantage, et d'une façon générale pour quelle raison certains sont **apodes**, d'autres **bipèdes**, **quadrupèdes** ou **polypodes**, ● et pourquoi les animaux pourvus de pieds les ont toujours en nombre **pair** : d'ailleurs d'une manière générale quand le mouvement se fait avec des points d'appui, ceux-ci sont en nombre pairs.

Il faudra savoir encore pourquoi **l'homme et l'oiseau sont bipèdes**, alors que les poissons n'ont pas de pieds, et pourquoi l'homme et l'oiseau, qui sont tous deux bipèdes, fléchissent les jambes en sens contraire. L'homme, en effet, a une **flexion convexe** de la jambe, l'oiseau une **flexion concave**. ● Et l'homme pour sa part oppose dans sa personne la flexion des jambes et celle des bras : (p. 13) la flexion de ses bras est concave, celle des genoux est convexe. Quant aux quadrupèdes vivipares, ils ont des flexions contraires à celles de l'homme, et opposées entre elles : les jambes de devant ont une flexion convexe, celles de derrière une flexion concave. ● D'autre part les quadrupèdes qui ne sont pas **vivipares** mais ovipares ont des flexions particulières dirigées vers le côté. Il faudra voir en outre pourquoi les quadrupèdes se meuvent en diagonale.

● Voilà **l'ensemble des problèmes** que nous aurons à examiner, ainsi que tous les autres qui leur sont liés. En ce qui concerne la réalité des faits, elle a été clairement établie dans **l'Histoire naturelle**, mais il faut maintenant en **rechercher les causes**.

Figure 6. Les problèmes relatifs à la locomotion. Barthélemy Saint-Hilaire Jules (1885) et Louis Pierre (1973).

Aristote débute ici, comme dans la plupart de ses ouvrages, par l'exposé de la méthode¹¹⁴ qu'il veut suivre : « En ce qui concerne les organes dont les animaux se servent pour se rendre d'un lieu à un autre, il faut examiner pour quelle raison chacun d'eux est ce qu'il est, et en vue de quelle fin, les animaux les possèdent ; il faut aussi étudier les différences que présentent entre eux les organes chez un seul et même animal et avec ceux des autres animaux d'un genre différent. »¹¹⁵

Il commence par énumérer les questions qu'il va discuter : « Mais précisons d'abord quelles sont les questions à examiner. »¹¹⁶ Il se propose donc de comparer, dans tout le règne animal, les organes de la locomotion et les appareils que la nature a su adapter, avec autant de variété que de justesse « La première est de savoir avec combien de points d'appui au minimum les animaux se meuvent ; on verra ensuite pourquoi les animaux sanguins en possèdent quatre,

¹¹⁴ Dumont J.-P. *Introduction à la méthode d'Aristote*. Paris : J. Vrin, 1986.

¹¹⁵ Aristote. op. cit., MA. Chap. 1. Paragraphe 1, p. 12.

¹¹⁶ Aristote. op. cit., MA. Chap. 1. Paragraphe 2, p. 12.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

*tandis que les non-sanguins en ont davantage... »*¹¹⁷. Avant tout, l'auteur observera exactement les faits et il essaiera d'en découvrir les causes en fondant ses théories sur les nombreuses observations faites : « *En ce qui concerne la réalité des faits, elle a été clairement établie dans l'Histoire naturelle, mais il faut maintenant en rechercher les causes. »*¹¹⁸ Les explications que l'on pourra donner seront éclairées et guidées par ce principe supérieur, à savoir que la nature ne fait jamais rien en vain, et qu'elle fait toujours le mieux possible « [...] prenons les principes dont nous avons l'habitude pour les avoir souvent utilisés dans l'étude de la nature [...] la nature ne fait rien en vain, mais réalise toujours le meilleur parmi les possibles qui correspond à l'essence de chaque animal [...] »¹¹⁹. En scrutant ses œuvres, on peut être assuré de découvrir le but qu'elle poursuit, et les moyens infaillibles dont elle se sert pour l'atteindre.¹²⁰

4. Les six directions de la locomotion

Le mouvement ne peut avoir lieu que dans six directions, qui se répartissent en trois séries de deux termes : le haut et le bas, le devant et le derrière, la droite et la gauche, « *il faut d'autre part considérer les dimensions de l'espace, voir combien il y en a, quelles elles sont et à quels êtres elles appartiennent »*¹²¹. Dans ces directions, le corps se meut soit en totalité, soit partiellement par poussée et/ou traction : « *Il faut ajouter en outre que les principes des mouvements de locomotion sont la poussée et la traction. »*¹²²

Par exemple, les « *saltigrades* » déplacent leur corps tout en entier, dans le saut qui leur est naturel et pour lequel ils sont faits ; chez la plupart des autres animaux, le mouvement n'est d'ordinaire que partiel et successif : « *Tous les animaux qui changent de lieu se déplacent par un mouvement qui affecte tantôt tout le corps d'un seul coup, comme dans le saut, tantôt des parties du corps, comme chaque fois qu'il y a marche. »*¹²³

Mais de quelque manière que le mouvement se produise, il faut toujours qu'il y ait en dehors de l'animal, ou dans l'animal lui-même, un point d'appui qui permette et facilite le jeu des appareils dont il est pourvu « [...] l'être qui se meut change de lieu en s'appuyant toujours sur le support qui est au-dessous de lui. ... L'être qui se met en mouvement utilise

¹¹⁷ Aristote. op. cit., MA. Chap. 1. Paragraphe 2, p. 12.

¹¹⁸ Aristote. op. cit., MA. Chap. 1. Paragraphe 6, p. 13.

¹¹⁹ Aristote. op. cit., MA. Chap. 2. Paragraphe 1, p. 13.

¹²⁰ Le Blond J.-M. *Logique et méthode chez Aristote : étude sur la recherche des principes dans la physique aristotélicienne*. Paris : Librairie philosophique J. Vrin, 1939.

¹²¹ MA. Chap. II. Paragraphe 3, p.14.

¹²² MA. Chap. II. Paragraphe 4, p. 14.

¹²³ MA. Chap. III. Paragraphe 1, p.14.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

toujours au minimum deux organes pour opérer son déplacement, l'un qui pour ainsi dire comprime et l'autre qui est comprimé »¹²⁴.

Chapitre II.

Application de la méthode générale à l'histoire naturelle : deux principes généraux ; optimisme ; sagesse de la nature ; les trois dimensions des corps ; deux principes du mouvement et de la locomotion ; différence du moteur et du mobile, l'un agissant par lui-même, et l'autre mù par une force étrangère.

● Après avoir indiqué préalablement, selon notre habitude, la méthode si souvent appliquée par nous à l'étude de la nature, nous poserons, pour point de départ de nos recherches, l'examen de tout ce qui peut être soumis à cette méthode dans les œuvres que la nature produit. (p. 329) ● Le premier principe que nous affirmons, c'est que la nature ne fait jamais rien en vain, et qu'elle réalise toujours le mieux dans le possible, conformément à l'essence de chaque espèce d'animal. Aussi, quand une chose est mieux d'une certaine façon, on peut s'assurer qu'elle est aussi de cette façon même de la nature. ● En second lieu, nous aurons à considérer les différentes dimensions de la grandeur, et à marquer comment sont réparties ces dimensions selon les êtres différents. On distingue six dimensions, qui se divisent en trois séries de deux chacune ; une première série, c'est le haut et le bas ; une seconde, le devant et le derrière ; et la dernière, la droite et la gauche. ● Il convient d'y ajouter les principes des mouvements de locomotion, c'est-à-dire la pulsion et la rétraction. Ces deux mouvements existent et agissent par eux-mêmes ; mais l'objet qui est déplacé par un autre objet n'a qu'un mouvement accidentel ; car ce qui est déplacé par quelque chose d'extérieur n'a évidemment pas la faculté de se mouvoir (p. 331) soi-même ; et c'est d'un autre qu'il reçoit son mouvement.

2. Rappel de quelques principes

● (p.13) Comme point de départ de cette recherche, prenons les principes dont nous avons l'habitude pour les avoir souvent utilisés dans l'étude de la nature, en considérant les phénomènes qui s'y conforment dans toutes les œuvres de la nature. ● L'un de ces principes est que la nature ne fait rien en vain, mais réalise toujours le meilleur parmi les possibles qui correspondent à l'essence de chaque animal. Aussi quand une chose est meilleure de cette façon, elle l'est aussi conformément à la nature.

● (p.14) Il faut d'autre part considérer les dimensions de l'espace, voir combien il y en a, quelles elles sont et à quels êtres elles appartiennent. Il existe six dimensions réparties en trois séries : la première comprend le haut et le bas, la seconde le devant et le derrière, la troisième la droite et la gauche.

● Il faut ajouter en outre que les principes des mouvements de locomotion sont la poussée et la traction. Certes celles-ci existent en soi, mais ce qui est déplacé par quelque chose d'autre a un mouvement accidentel. Car ce qui est déplacé par quelque chose ne semble pas se mouvoir soi-même, mais être mù par autre chose.

Figure 7. Rappel de quelques principes.

Dans le chapitre *Principe général du mouvement dans les animaux*, développé à l'intérieur des *Petits traités d'histoire naturelle*¹²⁵, avec le titre latin *Parva naturalia*, la logique explicative de la locomotion est abordée depuis la notion d'immobilisme, généralisable quel que soit le segment corporel, mais aussi la localisation. Pour exercer une force un point d'appui est indispensable pour appliquer une traction ou une poussée suffisante pour développer une force supérieure à celle de l'inertie.

Dans les courts extraits ci-dessous, Aristote précise en quelques mots sa conception du mouvement, sa création s'appuie sur l'immobilité d'un point d'appui. L'exemple de l'analyse de la flexion articulaire reflète toute la complexité de l'étude du mouvement selon qu'un os change de rôle de passif donc d'appui à celui actif se déplaçant. Souvent ce point est en dehors du corps permettant aux segments supérieurs ou inférieurs de l'animal de posséder une prise pour tracter ou pousser. Mais la source majeure du mouvement, c'est avant tout l'aspect psychique, celle du pouvoir de la volonté incitant au déplacement pour atteindre un but. L'âme intelligente se révèle essentielle, comme un point d'appui, elle impulse le souffle du cœur à l'instinct moteur.

¹²⁴ MA. Chap. III. Paragraphe 2, p.14.

¹²⁵ Aristote. *Psychologie d'Aristote. Opuscules (Parva Naturalia). Traduits en français pour la première fois et accompagnés de notes perpétuelles par Barthelemy Saint-Hilaire Jules.* [Le principe général du mouvement dans les animaux.] Paris : Dumont, 1847, p. 223.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

« Tout ce qu'on veut faire ici, c'est étudier la cause générale de ce mouvement, indépendamment des formes spéciales sans lesquelles il se produit. Nous avons établi aussi que le principe du mouvement était l'immobile, et que c'était ce qui se meut soi-même sans recevoir le mouvement du dehors »¹²⁶

[...] Pour voir une application directe de ce principe universel, il suffirait d'observer le jeu des articulations des animaux. Dans toute flexion, il y a un point qui fait centre et reste immobile, pour que le reste du membre puisse d'appuyer sur le lui. Ainsi, quand l'avant-bras se meut, c'est l'olécrane qui reste immobile ; quand le bras entier fait un mouvement, c'est l'épaule qui est immobile ; quand le bas de la jambe se meut, c'est le genou qui demeure, quand le membre entier se meut, c'est le bassin. L'on voit donc l'application de ce principe jusque dans les détails : pour qu'une chose quelconque se meuve, il faut qu'elle ait en elle un point qui reste immobile, et sur lequel le reste trouve, pour se mouvoir, un point d'appui qui ne bouge pas.¹²⁷

[...] Mais il faut nécessairement que ce point immobile soit en dehors de l'être qui se meut. [...] Il fait toujours remonter à un principe immobile qui ne fait point partie de ce qu'il meut.¹²⁸ [...] D'autre part, il faut que ce qui se meut ait au moins autant de force d'impulsion, que ce qui est mû a de force d'inertie.¹²⁹ [...] Ce qui est absolument immobile ne peut être mû par quoi que ce soit. Pour les animaux, le principe posé paraît tout à fait incontestable : il faut en eux un point de repos ; mais ce point ne suffit pas, et il faut un autre en-dehors, qui soit également immobile.¹³⁰

[...] Nous avons analysé aussi ailleurs la nature et l'espèce du mouvement que l'âme possède [...] Tout ce qui nous reste à chercher ici, c'est le mouvement que l'âme communique au corps, et la façon dont l'animal est mû [...] Ainsi les premiers moteurs, pour l'animal c'est l'objet conçu par l'intelligence, ou l'objet désiré par l'instinct¹³¹ [...] Ainsi en définitive ce qui meut l'animal, c'est l'appétit, mis en mouvement soit par la sensation, soit par l'imagination, soit par l'intelligence. Ceci a de l'analogie avec le jeu des automates, où il suffit de mouvoir un ressort unique pour que le reste se meuve et souvent d'une manière très compliquée. Les ressorts, chez les animaux, ce sont les nerfs et les os, seulement en eux les pièces sont variables dans leurs dimensions, tandis qu'elles ne le sont pas dans les automates.¹³²

[...] Le principe du mouvement est donc ce qui est à rechercher ou à fuir dans les choses que nous devons faire ; en d'autres termes, c'est le plaisir et la douleur [...] Les parties organiques qui composent le corps de l'animal sont admirablement disposées pour recevoir ces impressions diverses et se modifier sous l'action qu'elles éprouvent. Tout se passe avec une rapidité et une régularité merveilleuses. C'est du reste de l'âme que part le mouvement initial qui fait mouvoir les différentes portions du corps. Dans la flexion, il y a, comme on l'a dit, un point immobile qui sert d'appui, et un point qui se meut ; mais ni l'un ni l'autre n'a l'initiative du mouvement.¹³³

[...] Il faut nécessairement que le principe de l'âme motrice soit dans le centre de l'être, qui se trouve en un égal rapport, et avec les mouvements de haut en bas, de bas en haut, et avec les mouvements de droite à gauche, de gauche à droite. C'est là aussi que se trouve le siège de la sensibilité, dont les modifications influent sur tout le reste. Cette partie est une en puissance ; mais en acte elle est multipliée, parce qu'elle peut simultanément mouvoir plusieurs membres. Elle n'est donc pas un point mathématique ; elle est une grandeur réelle dans laquelle est placée l'âme motrice, toute différente qu'elle est certainement de cette grandeur même. L'intermédiaire par lequel l'âme ainsi placée agit sur le corps, c'est le souffle inné dans l'animal. L'âme est en quelque sorte le point immobile de l'articulation ; le souffle en est le point mobile. Le souffle inné est placé dans le cœur pour les animaux qui ont un cœur, et dans la partie correspondante pour les animaux qui en ont pas. [...] Par sa nature, le souffle semble tout à fait propre à communiquer le mouvement, puisqu'il peut lui-même, où se dilater ou se contracter. Voilà donc comment l'âme donne le mouvement au corps. L'animal entier dans sa constitution ressemble à un état gouverné par des lois.¹³⁴

¹²⁶ ibid., p. 223.

¹²⁷ ibid., p. 224.

¹²⁸ ibid., p. 225.

¹²⁹ ibid., p. 226.

¹³⁰ ibid., p. 227.

¹³¹ ibid., p. 228.

¹³² ibid., p. 230.

¹³³ ibid., p. 231-232.

¹³⁴ ibid., p. 232-233.

5. Le sens du mouvement

La vie étant aussi dans les végétaux, quoiqu'elle y soit à un degré moindre, il faut remarquer que le haut et le bas sont dans les plantes à l'inverse de ce qu'ils sont dans les êtres animés. Le haut véritable de la plante constitue sa racine ; le bas véritable représente sa tige, quoique le témoignage de nos yeux semble nous dire le contraire. Mais comme dans l'animal le haut équivaut à la partie dans laquelle satisfait la nourriture qui se distribue à tout l'organisme, et comme avec la racine les plantes se nourrissent, donc avec cette cause chez elles, la racine doit être regardée comme le haut, quoiqu'elle paraisse être le bas « [...] il existe trois sortes de localisations dans l'espace, le haut, le milieu et le bas »¹³⁵. C'est la fonction et non la position, qui fait la différence « C'est le haut qui est le principe... »¹³⁶. Dans l'animal, le devant et le derrière sont déterminés par la situation des sens, et spécialement par la situation de la vue, chargée de le conduire « [...] la partie où se produisent naturellement les sensations et d'où elles sont perçues pour chacun des animaux, constitue le devant, tandis que la partie opposée est le derrière »¹³⁷.

La droite et la gauche se distinguent en ceci que la partie qui a l'initiative habituelle du mouvement commence par la droite, et que la partie opposée à celle-là devient la gauche. La troisième série, celle du devant et du derrière, est en quelque sorte mutilée, en ce que les animaux marchent naturellement devant eux, et qu'aucun ne marche en arrière, où selon un mouvement de contre nature. Il y a cependant certaines classes d'animaux inférieurs, comme les mollusques et les crustacés turbinés, où il s'avère malaisé de distinguer le derrière et le devant, ou la droite et la gauche, soit par leur confrontation, soit par leurs allures « le principe du changement de lieu, est la droite pour chaque animal, la partie opposée, dont la nature est de suivre l'autre, est la gauche [...] le principe d'où part le mouvement est la droite »¹³⁸.

C'est dans l'homme que toutes ces différences s'affirment les mieux marquées, parce qu'il correspond à l'être le plus complet et que le haut et le bas, le devant et le derrière, la droite et la gauche, se caractérisent chez lui le plus nettement. La station droite n'appartient guère qu'à l'homme ; il se montre essentiellement bipède, et sa position verticale concorde avec celle de l'univers lui-même. L'oiseau a bien cette espèce de station, mais en lui elle s'annonce moins régulière, pour pouvoir se tenir debout, il a

¹³⁵ MA. Chap. V. Paragraphe 3, p. 18.

¹³⁶ MA. Chap. IV. Paragraphe 2, p. 15.

¹³⁷ MA. Chap. IV. Paragraphe 4, p. 16.

¹³⁸ MA. Chap. IV. Paragraphe 5, p. 16.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

reçu une ossature du bassin toute spéciale, fort différente du bassin de l'homme. D'ailleurs, les ailes représentent pour l'oiseau, ce que les bras et les mains constituent pour nous. Comme la droite commence le mouvement, on peut dire qu'il se révèle plus important que la gauche, de même que le haut plus important que le bas, et le devant, plus important que le derrière : « *En effet, le principe est quelque chose de noble : or le haut est plus noble que le bas, le devant que le derrière et la droite que la gauche.* »¹³⁹

Chapitre V. (p. 343)

Le haut et le devant sont marqués surtout chez les animaux à deux pieds : l'homme et l'oiseau ; les quadrupèdes, les polyodes et les apodes, définition du pied ; le haut, le milieu et le bas, chez les animaux et les végétaux ; singularité des plantes ; position moyenne des quadrupèdes, des polyodes et des apodes ; la station droite et ses nécessités ; importance relative des principes de mouvement, et des lieux où ils sont placés.

● Tous les animaux chez lesquels le haut et le devant sont déterminés comme ils le sont dans l'homme et dans l'oiseau, sont pourvus de deux pieds. Des quatre membres que possède l'animal, deux, chez les uns, sont des ailes ; chez les autres, ce sont des mains et des bras. Les animaux chez lesquels **le devant et le haut sont dans le même sens** sont, ou tous quadrupèdes, ou ils ont plus de quatre pieds, ou ils sont pieds. ● J'appelle **Pied** la partie représentée par le membre qui marche et qui produit le mouvement (p. 344) de locomotion ; car il semble qu'on ait tiré dans la langue grecque le nom de Pied du mot qui exprime le Plan sur lequel le pied s'appuie. ● Il y a des animaux qui ont le devant et le derrière confondus dans le même sens : par exemple, les mollusques, et les turbinés parmi les **crustacés**. Nous ne nous y arrêtons pas, attendu que nous en avons déjà parlé ailleurs. Mais les lieux étant au nombre de trois, **le haut, le milieu et le bas**, les animaux à deux pieds ont leur haut dirigé vers le haut de l'univers entier, tandis que les **polyodes** ou les **apodes** sont dirigés vers le milieu, et que les plantes le sont vers le bas. ● Ce qui fait cette disposition des végétaux, c'est (p. 345) qu'ils sont immobiles, et que, le haut se rapportant toujours à l'alimentation, c'est de la terre que les végétaux tirent ce qui les nourrit. Quant aux quadrupèdes, aux polyodes et aux animaux sans pieds, ils répondent au point milieu, parce qu'ils n'ont pas de **station droite**. Au contraire, les animaux à deux pieds se rapportent au haut, parce qu'ils sont droits ; ce qui est marqué chez l'homme plus que chez tout autre animal, attendu que par sa nature, il est au suprême degré un être à deux pieds.

● Du reste, la raison comprend très bien que les principes de mouvement partent de ces points divers. **Le principe est ce qu'il y a de plus important et de plus digne d'attention. Le haut est plus important que le bas ; le devant, plus que le derrière ; et le (n. 346) droit l'est plus que le gauche.** Il est donc tout à fait dans l'ordre que l'on dise de ces parties, les unes à l'inverse de ce qu'on dit des autres, que c'est parce que **ces parties renferment les principes**, qu'elles sont par cela même plus importantes que les parties opposées.

5. Définition du haut et du devant.

● (p. 18) Tous les animaux chez qui se distinguent le haut et le devant, par exemple l'homme et les oiseaux, sont des bipèdes des **quatre points d'appui**, deux sont chez les uns les ailes et chez l'autre les mains et les bras. Au contraire, les animaux où se confondent le devant et le haut ont quatre pieds, des pieds multiples ou n'ont pas de pieds. ● J'appelle pied une partie qui fournit **un point d'appui** sur le sol pour un mouvement de locomotion : il semble, en effet, que le mot pied (*podés*) vienne du mot sol (*pedon*).

● Certains animaux ont le devant et le derrière conformés de la même façon, par exemple les céphalopodes et, parmi les testacés, les turbinés. Mais nous avons parlé d'eux précédemment ailleurs.

Comme il existe **trois sortes de localisation dans l'espace, le haut, le milieu et le bas**, les bipèdes ont le haut dirigé vers le haut de l'univers, les polyodes et les apodes l'ont vers le milieu et les végétaux vers le bas. ● La cause en est que les végétaux sont immobiles, que le haut sert à la nourriture et que la nourriture pour eux vient de la terre. Les **quadrupèdes**, eux, sont dirigés vers le milieu, comme les **polyodes** et les **apodes**, parce qu'ils ne se tiennent pas droits. Au contraire, les bipèdes sont dirigés vers le haut, parce qu'ils sont droits, l'homme tout particulièrement car c'est par excellence le bipède conforme à la nature.

● Il est d'ailleurs rationnel que les principes se trouvent en ces différentes parties. **En effet, le principe est quelque chose de noble : or le haut est plus noble que le bas, le devant que le derrière et la droite que la gauche.** On peut d'ailleurs, à propos des trois renverser l'affirmation et dire que le fait que certaines parties renferment les principes, les rend plus nobles que les parties opposées.

Figure 8. Définition du haut et du devant.

Entre les deux termes de chaque série, il y a des rapports qui se montrent difficiles à définir. Le principe qui produit le mouvement à droite est le même qui produit le mouvement à gauche ; rien ne sépare distinctement l'une de ces directions de la direction contraire, et l'évidence signale qu'il n'y a pas là de discontinuité. On peut dire autant du haut et du bas, que du devant et du derrière. Il y a donc entre chacun des deux termes un terrain commun où ils se rencontrent et se confondent « *il faut un point commun où s'établisse la continuité entre ces parties et où se trouve le principe du mouvement aussi bien que de l'arrêt* »¹⁴⁰. Ce point représente le principe moteur que l'animal porte en lui-même, et qui décide la

¹³⁹ MA. Chap. V. Paragraphe 5, p. 18.

¹⁴⁰ MA. Chap. VI. Paragraphe 1, p. 19.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

locomotion dans un sens ou dans l'autre, selon le besoin ou la volonté. Le principe moteur est immobile ; car il faut toujours un point d'inertie pour que le mouvement soit possible dans une des directions « *tous ces organes ont pour principe commun l'endroit où se rejoignent les parties dont nous avons parlé, à savoir la droite et la gauche, le haut et le bas, le devant et le derrière* »¹⁴¹.

Les animaux qui ont du sang ont quatre appareils de locomotion, et ils ne peuvent en avoir davantage. Mais les animaux dépourvus de sang peuvent en avoir un plus grand nombre. Une autre différence entre ces deux genres d'animaux, c'est que ceux qui ont du sang cessent de se mouvoir et de vivre quand on les coupe en deux, tandis que les exsangues peuvent vivre et se mouvoir longtemps après qu'on les a coupés « *[...] qu'aucun animal sanguin ne peut se mouvoir avec plus de quatre points d'appui, et que si un être ne se meut naturellement qu'avec quatre points d'appui, c'est nécessairement un animal sanguin* »¹⁴². On dirait que ceux-là sont composés de plusieurs animaux réunis, ayant chacun une vie à part. Les serpents et certains poissons, qui n'ont pas de nageoires, par exemple, les murènes, remplacent les quatre appareils qui leur manquent par les flexions de leur corps allongé, tantôt convexes, tantôt concaves, à droite et à gauche, en haut et en bas. À leur niveau encore, on peut retrouver les quatre appareils, bien que sous une autre forme.

Les pieds de l'animal se présentent toujours en nombre pair, quel qu'en soit le nombre : « *Il est donc évident que le mouvement de locomotion appartient seulement ou surtout aux animaux qui changent de place grâce à deux ou à quatre points d'appui.* »¹⁴³ Avec quatre pieds, il a une station très solide ; mais on ne pourrait pas en concevoir qu'il pût marcher avec trois ; et en réalité, la nature n'offre pas une seule combinaison de cette espèce.

¹⁴¹ MA. Chap. VI. Paragraphe 2, p. 19.

¹⁴² MA. Chap. VII. Paragraphe 1, p. 19.

¹⁴³ MA. Chap. VII. Paragraphe 1, p. 20.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

Chapitre VI.

La droite commence le mouvement; division nécessaire du mouvement en deux parties, l'une qui se meut, l'autre qui est immobile; point commun à toutes deux; même théorie pour le point d'inertie; mouvement en avant; pas de mouvement naturel en arrière; corrélation intime du haut et du bas, d'une part; d'autre part, de la droite et de la gauche; il n'y a de part et d'autre qu'un seul et même principe pour les deux; vraisemblance de ces explications pour deux des trois dimensions.

●Ce que nous venons de dire suffit pour montrer bien évidemment que **c'est par la droite que commence le mouvement**. Mais, dans tout continu, où une partie se meut tandis que l'autre partie reste immobile, (p. 347) le tout pouvant se mouvoir dans l'immobilité de l'une des parties, comme alors les deux parties sont soumises à des mouvements contraires, il faut nécessairement qu'il y ait **un point commun à toutes les deux** où s'établit leur continuité mutuelle, et d'où parte le mouvement de chacune de ces parties. ●Ceci n'est pas moins évident quand le corps est à l'état de repos, toutes les fois que chacune des parties opposées l'une à l'autre ont un mouvement propre, selon les antithèses dont nous venons de parler. **Il faut alors qu'elles aient toutes un principe commun où se trouve la connexion intime des parties en question** ; je veux dire, de la droite et de la gauche, du haut et du bas, du devant et du derrière. ●Pour le devant et le derrière, il n'y a point de distinction de (p. 348) ce genre dans l'être qui a la faculté de se mouvoir lui-même, parce qu'il n'y a pas un seul être qui ait naturellement le mouvement en arrière, et que l'être mis en mouvement n'a pas de détermination qui dirige son mouvement dans l'une ou l'autre de ces deux directions indifféremment. Mais pour la droite et la gauche, il y a une distinction, et il y en a également pour le haut et le bas. ●Voilà comment, chez les animaux qui marchent à l'aide de membres organisés dans cette vue, il n'y a pas de détermination résultant de la différence du devant et du derrière. Mais pour les deux autres différences, cette détermination existe, la première distinguant la droite et la gauche, attendu que l'une de ces différences se trouve de toute nécessité et immédiatement dans les deux, et que l'autre se trouve dans les quatre premiers. ●Puis donc (p. 349) que le haut et le bas, la droite et la gauche, sont essentiellement liés à un même principe qui leur est commun, je veux dire le principe maître du mouvement, il faut, dans tout être qui doit exécuter régulièrement le mouvement partant de chacun de ces points, que la cause de tous les mouvements dont il vient d'être question soit en quelque sorte **déterminée et ordonnée par les intervalles** qui existent entre ces principes, soit de série opposée, soit de même série que les principes qui sont dans ces parties. ●C'est donc précisément **le mouvement de droite et de gauche qui est le principe commun d'où partent les mouvements** (p. 350) dans l'animal. L'explication est la même pour les mouvements de haut et de bas. C'est là ce qu'on doit supposer, en tant du moins qu'il se passe quelque chose qui en approche, pour chacun des principes dont sont animées les parties indiquées par nous.

6. Principe général des mouvements.

●(p.19) Ce qui vient d'être dit montre donc bien que **c'est à droite que se trouve le principe du mouvement**. Mais puisque nécessairement dans un tout continu dont une partie se meut et l'autre reste immobile, l'ensemble pouvant se mouvoir alors que l'une des deux parties reste au repos, comme les deux parties sont susceptibles de mouvements inverses, **il faut un point commun où s'établit la continuité entre ces parties et où se trouve le principe du mouvement aussi bien que de l'arrêt**, ●il est évident que, toutes les fois que selon le jeu des antithèses dont nous avons fait état un mouvement propre affecte chacun des organes qui s'opposent, tous ces organes ont pour **principe commun l'endroit où se rejoignent les parties** dont nous avons parlé, à savoir la droite et la gauche, le haut et le bas, le devant et le derrière.

●Pour ce qui est du **devant et du derrière**, il n'y a pas lieu de tenir compte de leur distinction quand il s'agit d'un être qui se meut soi-même, parce que aucun animal ne se meut naturellement vers l'arrière, et que l'être qui est mu n'a pas à distinguer entre les deux sens celui dans lequel il effectuera son déplacement. Au contraire, le problème se pose pour la droite et la gauche et pour le haut et le bas.

●C'est pourquoi chez tous les animaux qui utilisent des membres pour progresser, ceux-ci se différencient non pas par la distinction entre le devant et le derrière, mais par celles qui restent, les deux autres, la principale étant toutefois celle qui distingue la droite et la gauche, parce l'autre apparaît nécessairement tout de suite dans le cas de deux membres, tandis que celle-ci se présente d'abord quand il y en a quatre.

●(p.20) Puisque donc le haut et le bas, la droite et la gauche se trouvent rattachés les uns et les autres au même principe commun (j'entends par là **le principe qui commande le mouvement**)... Mais il faut qu'en tout être appelé à effectuer convenablement le mouvement qui procède de chacune de ses parties, la cause de tous les mouvements dont nous parlons soit en quelque sorte délimitée et définie dans l'intervalle qui sépare les principes dont il a été question et qui dans ces parties-là agissent parallèlement ou se croisent ● le principe commun d'où part le mouvement dans l'animal est le même que celui de la droite et de la gauche, ainsi que du haut et du bas, et il faut d'autre part que ce **principe soit en chaque être aussi près que possible de chacun des principes qui se trouvent dans les parties en question**.

Figure 9. Principe général des mouvements.

Les « scolopendres » polypodes auxquels on a retranché quelques pieds peuvent marcher, il est vrai, avec un nombre impair de pieds ; mais c'est seulement en suppléant à ceux qu'on leur a retranchés par ceux qui leur restent ; et la loi de parité n'en est pas moins applicable à ces animaux comme à tous les autres.

Le mouvement, qu'elles qu'en soient la direction et la nature, n'est possible qu'à la condition d'une flexion. Dans la progression, le membre qui s'avance, tandis que l'autre devenu perpendiculaire soutient le corps, doit nécessairement s'infléchir avant de toucher le sol, et avant de devenir droit à son tour, pour fournir successivement au corps l'appui qui lui devient indispensable « [...] *le poids du corps passant des parties en mouvement sur celles qui ne bougent pas* »¹⁴⁴. La flexion du membre s'avère tantôt convexe comme celle du genou, et tantôt concave comme celle des bras. Si le membre ne s'infléchissait pas,

¹⁴⁴ MA. Chap. VIII. Paragraphe 4, p. 24.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

la marche serait caduque, et l'animal ne ferait que tomber, « [...] aucun être ne pourrait marcher d'une manière continue et sûre s'il se tenait raide [...] l'être qui se meut progresse tantôt par extension, tantôt par flexion il se tient droit grâce aux membres qui dirigent le mouvement et fait des flexions avec ceux qui le suivent. Les animaux qui sautent, eux-mêmes, opèrent tous la flexion dans la partie du corps qui leur sert de support, et c'est de cette façon qu'ils sautent »¹⁴⁵. En même temps que le membre avance, la tête s'abaisse, en se projetant pour contribuer à transporter le poids du corps sur la jambe qui s'efforce de le recevoir : « Dans tous les changements en question la flexion ou l'extension concernent nécessairement un point d'appui déterminé. »¹⁴⁶ La flexion nécessaire au mouvement est évidente également dans la reptation des serpents, dans l'ondulation des chenilles, dans les battements des ailes des oiseaux, dans les battements des nageoires des poissons, qui sont tantôt droites et tantôt recourbées. Enfin, c'est par la flexion de la queue et du corps que les poissons plats, même quand ils sont dépourvus de nageoires, progressent dans le liquide, qu'ils couvrent de leur largeur exceptionnelle « mais tous les animaux, nous l'avons dit, opèrent leurs changements de lieu par flexion et extension »¹⁴⁷.

Le mouvement des volatiles se complique davantage ; les pattes sont nécessaires aux oiseaux pour voler, de même que les ailes le sont pour marcher. Ces corrélations indirectes semblent du premier coup d'œil assez étrange ; mais il en est pour les oiseaux comme pour l'homme, qui ne saurait marcher sans le mouvement alternatif de ses épaules, si ce n'est de ses bras. Chez l'oiseau, la queue, suspendue au croupion, dirige le vol, de la même façon que le gouvernail dirige le navire : « Les plumes du croupion, chez les animaux qui volent, sont destinées à diriger le vol... »¹⁴⁸ Les volatiles à ailes pleines, comme les coléoptères, qui n'ont pas de plumes à leurs croupions, ni aux ailes, volent mal, et s'abattent lourdement. Voilà pourquoi les oiseaux qui volent peu, comme le paon, le coq, les gallinacés, ne sauraient diriger leur vol en ligne droite. Les oiseaux de grand vol, hérons et flamants, étendent, en volant, leurs pattes en arrière, pour suppléer au rôle de leur queue, qui ne les dirige point. Chez les oiseaux de proie, pour qui la rapidité du déplacement est une condition d'existence, tout est calculé dans cette vue : leur petite tête, leur col mince et leur thorax très charnu et profilé afin qu'ils puissent d'autant mieux

¹⁴⁵ MA. Chap. IX. Paragraphe 2, p. 25.

¹⁴⁶ MA. Chap. IX. Paragraphe 4, p. 25.

¹⁴⁷ MA. Chap. X. Paragraphe 2, p. 27.

¹⁴⁸ MA. Chap. X. Paragraphe 3, p. 28.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

fendre l'air. De plus, les parties postérieures de leur corps sont à la fois plus légères et plus rétrécies, afin de ne pas ralentir leur vélocité.

Si la partie haute du corps des oiseaux devenait plus lourde, ils ne pourraient se tenir debout, pas plus que les enfants, qui avant de marcher vertical se traînent d'abord sur le sol en s'appuyant sur leurs quatre membres. Mais, comme, plus tard, la partie inférieure du corps, chez les enfants, se développe davantage, ils peuvent se redresser, ils finissent par marcher comme il convient à espèce humaine. Si les oiseaux ne sont pas conformés pour avoir jamais une station aussi droite que la nôtre, notre conformation nous rendrait leurs ailes inutiles.

Chapitre X (p. 369)

Du vol des oiseaux et du mouvement général des volatiles ; nécessité de l'action simultanée des ailes et des pattes ; de la flexion et de l'extension des ailes pleines et des ailes divisées en plumes ; de l'action de la queue, faisant fonction de gouvernail ; vol irrégulier des volatiles sans queue et à ailes pleines ; actions des pattes dans le vol des oiseaux de grand vol : les coléoptères ; queue inutile du paon ; rapidité du vol des oiseaux de proie ; leur tête, leur cou, leur thorax, conformés en vue du vol ; légèreté relative de leurs parties postérieures.

● On peut se demander comment les oiseaux sont quand ils volent, soit quand ils marchent, **se meuvent avec quatre appareils**, puisque nous avons dit que c'est par quatre appareils que doivent se mouvoir tous les animaux qui ont du sang ; mais on n'a pas dit que, ce fût par quatre appareils précisément, mais on a dit seulement qu'ils ne peuvent pas se mouvoir par plus de quatre. Ce qui est vrai, c'est que les oiseaux ne pourraient pas voler si on leur ôtait leurs pattes, et qu'ils ne pourraient pas non plus marcher si on leur ôtait leurs ailes, pas plus que l'homme ne (p. 370) peut marcher sans mouvoir les épaules. ● Ce qui n'est pas moins vrai, ainsi qu'on l'a dit, c'est que **tous les êtres ne se déplacent que grâce à la flexion et à l'extension**, puisque tous ne peuvent progresser que sur un appui placé, jusqu'à un certain point, sous eux, et dans un milieu qui leur cède. Par une conséquence nécessaire il faut que, si la flexion n'a pas lieu dans une autre partie, elle ait lieu au moins dans la partie d'où part le mouvement. Pour les volatiles dont les ailes sont pleines ; c'est de cette aile même qu'il part, pour les oiseaux ordinaires, c'est de la plume ; et pour les autres animaux, pour les poissons, par exemple, c'est de la partie correspondante. Chez d'autres, enfin, tels que les serpents, le principe de la flexion est dans les flexions mêmes du corps. ● Chez l'animal qui vole **la queue** du croupion est (p. 371) destinée à régler le vol, qu'elle dirige, comme le gouvernail dirige les bateaux ; car il faut que les gouvernails aussi fléchissent dans la jointure qui les unit au navire. C'est là ce qui fait que les volatiles dont les ailes sont pleines, et, parmi les oiseaux à ailes divisées ceux chez qui la queue du croupion n'est pas naturellement consacrée à la fonction qu'on vient de dire, tels que le paon, le coq, et, en général, les oiseaux qui ne volent pas beaucoup, c'est là ce qui fait, disons-nous, que ces oiseaux ne dirigent, pas leur vol en ligne droite.

10. Conditions du vol des oiseaux.

● (p.27) On pourrait peut-être se demander comment les oiseaux se meuvent avec quatre points d'appui quand ils volent ou quand ils marchent, si l'on se rappelle ce que nous avons dit, à savoir que **tous les animaux sanguins se meuvent avec quatre points d'appui**. En fait, ce n'est pas ce qui a été dit, mais seulement qu'il faut quatre points d'appui au maximum. Cependant les oiseaux ne pourraient pas voler si les pattes leur étaient enlevées, ni marcher s'ils étaient privés de leurs ailes, **puisque'un homme ne peut pas non plus marcher s'il ne balance dans une certaine mesure les épaules**.

● **Mais tous les animaux, nous l'avons dit, opèrent leurs changements de lieu par flexion et extension**. Car tous progressent sur le substrat jusqu'à un certain point comme sur une matière qui cède ; aussi est-il nécessaire que, si la flexion ne se produit pas dans une autre partie, (p.28) elle ait lieu au moins à l'endroit où se trouve le principe de l'aile particulière des animaux à ailes pleines, de l'aile emplumée chez les oiseaux, et chez les autres, par exemple les poissons, de la partie correspondante. Chez certains, comme les *serpents*, c'est dans les flexions de leurs corps que se trouve le principe de la flexion.

● **Rôle de la queue dans le vol**. Les plumes du croupion, chez les animaux qui volent, sont destinées à diriger le vol : elles ont le même rôle que les **gouvernails** sur les bateaux. Mais il est nécessaire que ces parties, elles aussi, fléchissent à leur point d'attache. Voilà pourquoi les animaux à ailes pleines et, parmi les possesseurs d'ailes à plumes séparées, ceux dont le croupion n'est pas naturellement apte à exercer la dite fonction, comme les **paons**, les **coqs** et d'une manière générale les mauvais **voliers**, ne vont pas en ligne droite.

Figure 10. Conditions du vol des oiseaux.

En comparant les flexions similaires à l'homme, non plus aux flexions de l'oiseau, mais à celles du quadrupède vivipare, on voit qu'elles s'accomplissent en sens contraires. Chez l'homme, les flexions des bras, c'est-à-dire des membres antérieurs, se font en creux ; et celles des membres postérieurs, en cercle : « *Mais toujours, chez l'homme, les flexions des membres se succèdent en sens opposés [...] les membres inférieurs sont disposés à l'inverse*

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

des membres supérieurs : leurs principes, en effet, sont opposés. »¹⁴⁹ Chez les quadrupèdes, c'est tout l'opposé ; les membres de devant s'infléchissent en rond, et les membres postérieurs s'infléchissent en creux. Ici encore, il faut l'évolution de la nature. Si les quadrupèdes fléchissaient leurs pattes de devant en forme concave, au lieu de la forme convexe, ils ne s'élèveraient pas suffisamment au-dessus du sol, et ils ne marcheraient pas à l'aise ; et de même, si leurs pattes de derrière s'infléchissaient en cercle, elles gêneraient la marche sous leur centre ; ils auraient en outre beaucoup plus de peine pour allaiter leurs petits.

D'ailleurs, les flexions ne peuvent avoir lieu que de quatre manières, ou les membres de devant et de derrière peuvent être fléchis dans un seul et même sens, soient convexes, soient concaves, ou fléchis à l'opposé les uns des autres, les uns étant concaves, tandis que les autres seraient convexes. De ces quatre combinaisons possibles, la nature n'en admet que deux, les autres n'étant pas commodes pour l'animal « *Les différents modes de flexion aux articulations étant au nombre de quatre.* »¹⁵⁰. Dans un seul et même membre, les flexions se contrarient, afin de rendre le mouvement plus facile et plus harmonieux. Ainsi, la cuisse fléchit en creux sur la hanche ; le genou fléchit en rond sur la cuisse, et le pied fléchit en creux sur le tibia ; enfin, les doigts fléchissent en rond sur le pied. Tout devient plus souple et plus stable.

Dans la marche des quadrupèdes, le mouvement a lieu en diagonale, le pied gauche de derrière se levant en même temps que le pied droit de devant ; et le pied droit de derrière, en même temps que le pied gauche antérieur : « *En effet, après le membre antérieur droit les animaux meuvent le membre postérieur gauche, puis l'antérieur gauche et enfin le postérieur droit.* »¹⁵¹

¹⁴⁹ MA. Chap. XIII. Paragraphe 3, p. 34.

¹⁵⁰ MA. Chap. XIII. Paragraphe 1, p. 33.

¹⁵¹ MA. Chap. XIV. Paragraphe 1, p. 34.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

Chapitre XV. (p. 392)

Flexions des pattes chez les oiseaux ; les ailes remplacent les membres antérieurs ; leur rôle indispensable ; organisation de la cuisse des oiseaux ; position de leurs ailes ; position des nageoires chez les poissons ; ailes des volatiles à ailes pleines ; progression de tous ces animaux ; disposition des membres sur le côté dans les crocodiles, les lézards, les tortues, etc. ; explication de cette disposition.

❶ Les oiseaux fléchissent leurs pattes à la manière des quadrupèdes, et leur nature se rapproche à certains égards de la leur. Chez les oiseaux, les ailes remplacent les membres de devant ; et de là vient que leurs ailes se plient dans le même sens que les membres antérieurs chez les quadrupèdes. Pour eux, c'est des ailes que part le principe naturel de la locomotion et du mouvement nécessaire à la marche, puisque le vol est leur mouvement spécial.

❷ Aussi, il n'y pas un oiseau qui put, si on lui enlevait ses (p. 393) ailes, se tenir debout, ni avancer d'un pas. De plus, comme l'oiseau, tout bipède qu'il est, n'est pas fait pour se tenir droit, et comme les parties antérieures de son corps sont plus légères, il est indispensable, ou du moins il est mieux, pour lui faciliter la station droite, que sa cuisse soit placée en dessous, ainsi qu'elle l'est; je veux dire par là qu'elle est naturellement placée à la partie postérieure. Du moins qu'il fallait qu'il en fut ainsi, il y a nécessité que la flexion de la patte soit concave, par la même raison qui fait que, dans les quadrupèdes, les membres de derrière sont ainsi fléchis, selon l'explication que nous avons donnée pour les quadrupèdes vivipares. ❸ En général, les oiseaux et les volatiles à ailes pleines, et même les animaux qui nagent dans les eaux et qui ont des organes particuliers pour se mouvoir dans le liquide, doivent être munis de ces organes sur les côtés, en forme d'appendices. Il n'est pas difficile de se convaincre que cette organisation est la meilleure, comme (p. 394) on peut l'observer actuellement, soit dans les oiseaux, soit dans les volatiles à ailes pleines. C'est également ce qu'on peut remarquer dans les poissons ; car, pour les animaux aquatiques, les nageoires sont ce que les ailes sont pour les oiseaux. ❹ Dans les volatiles à ailes pleines, les *Ptilis* sont placés sur le côté, parce que c'est dans cette position que ces organes, en divisant, de la façon la plus rapide et la plus puissante, ici l'air, et là le liquide, peuvent produire le mouvement. Les parties du corps sont portées à la suite en avant et en arrière, dans le milieu qui cède devant elles, dans le liquide pour les uns, et dans l'air pour les autres. ❺ Les quadrupèdes ovipares qui vivent dans des trous, comme les *crocodiles*, les *lézards*, les *stellions*, les *émydes* et les *tortues*, ont tous les pattes (p. 395) obliquement attachées sur le côté et étendues sur la terre ; ils les fléchissent toujours de côté, à la fois pour faciliter leur entrée sous terre, et leur incubation sur les neufs, pendant qu'ils les gardent. Ces membres étant au dehors, il faut nécessairement que ces animaux avancent les cuisses et les placent sous eux pour pouvoir élever le corps ; et, pour arriver à ce mouvement, il n'est pas possible que la flexion ait lieu autrement qu'à l'extérieur.

15. Les membres des oiseaux.

❶ Les oiseaux fléchissent leurs pattes comme les quadrupèdes. Car leur nature est d'une certaine manière proche de la leur : chez les oiseaux les ailes tiennent lieu des pattes de devant. C'est d'ailleurs pourquoi elles sont courbées de la même façon que les membres antérieurs (p.36) chez les quadrupèdes, puisque chez les oiseaux le principe du changement, du mouvement qui constitue la marche, part des ailes : car le vol est le mouvement particulier de ces animaux. ❷ Aussi aucun oiseau ne pourrait-il se tenir debout ni progresser si on lui enlevait les ailes.

De plus, comme l'oiseau est bipède et ne se tient pas droit, comme d'autre part les parties antérieures de son corps sont plus légères, il est nécessaire ou préférable, pour qu'il puisse se tenir debout, qu'il ait la cuisse située sous le corps comme elle l'est effectivement, c'est-à-dire naturellement placée vers l'arrière. Cependant, puisqu'il fallait qu'il en fut ainsi, il est nécessaire que la flexion de la patte soit concave, comme l'est chez les quadrupèdes celle des membres postérieurs, pour la raison que nous avons donnée à propos des quadrupèdes vivipares.

❸ D'une manière générale, à propos des oiseaux, des animaux qui volent avec des ailes pleines ainsi que de ceux qui nagent dans l'élément liquide, c'est-à-dire tous ceux qui se déplacent dans l'eau grâce à des organes de propulsion, il n'est pas difficile de voir qu'il est préférable qu'ils aient les parties en question en appendice sur le côté, comme on s'en rend compte effectivement chez les oiseaux et les animaux à ailes pleines. C'est également ce que l'on constate chez les poissons : en effet, les ailes sont aux oiseaux ce que les nageoires sont aux animaux aquatiques. ❹ Quant aux ailes des animaux à ailes pleines, elles se développent en appendice sur le côté. Car c'est de cette façon qu'ils peuvent avoir le plus de rapidité et de puissance pour fendre les uns l'air, les autres l'eau et effectuer ainsi leur mouvement : en effet, même les parties postérieures de leur corps peuvent suivre vers l'avant, car elles sont portées dans un milieu (p.37) qui cède devant elles et qui est pour les uns l'élément liquide, pour les autres l'air.

❺ Les pattes des reptiles. Les quadrupèdes ovipare qui gîtent dans des trous comme les *crocodiles*, les *lézards*, les *stellions*, les *tortues* d'eau douce et les tortues terrestres, ont tous les pattes attachées sur le côté et étendues sur le sol, et ils les fléchissent vers le côté, parce que cette disposition est utile pour favoriser leur retraite sous terre et pour leur permettre de couvrir et de protéger leurs veufs. Leurs pattes étant dirigées vers l'extérieur, il est nécessaire qu'ils ramassent leurs cuisses et les replient sous eux pour pouvoir soulever l'ensemble de leur corps. Mais au cours de ce mouvement, il n'est pas possible qu'ils fléchissent autrement que vers l'extérieur.

Figure 11. Les membres des oiseaux.

Si les deux membres de devant se lèvent à la fois, cela ne constitue plus une allure de marche, mais un véritable saut, exigeant un très grand effort, et ne peut avoir que très peu de durée, ainsi qu'on le constate pour les chevaux de course. Si, dans la marche ordinaire, les deux pieds de devant partaient ensemble, l'animal risquerait de tomber à chaque pas. L'animal peut marcher encore en mettant simultanément en mouvement les deux membres d'un même côté ; mais alors l'allure est moins naturelle et moins solide. L'allure la plus ferme et la plus facile est l'allure en diagonale, qui assure constamment des appuis aux deux parties, droite et gauche, du corps en mouvement. Quoique la marche par diagonale soit de règle, il y a des animaux qui, comme les crabes, marchent obliquement, au lieu de marcher droit devant eux. Cependant, les crabes mêmes ne font exception qu'à moitié ; car la nature a eu soin de placer leurs yeux obliquement aussi, de sorte que, grâce à cette particularité, on peut dire que les crabes marchent en ligne droite comme tous les autres animaux.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

L'organisation des oiseaux n'est peut-être pas aussi éloignée de celle des quadrupèdes que l'on pourrait le croire « [...] *chez les oiseaux le principe du changement, du mouvement qui constitue la marche, part des ailes : car le vol est le mouvement particulier de ces animaux* ». ¹⁵² Les ailes, qui, chez eux, remplacent les membres de devant, se replient dans le même sens que les membres antérieurs des quadrupèdes. La plus grande différence, c'est la position de la cuisse, qui, chez l'oiseau, est plus avancée sous le ventre, afin de soutenir le corps, qui ne peut jamais être aussi droit que celui de l'homme. Les ailes sont placées sur les côtés, comme les nageoires le sont en général chez les poissons ; car c'est par cette disposition que les nageoires et les ailes peuvent être le plus utile, les unes et les autres, pour fendre l'air ou le liquide. C'est dans une intention pareille que les quadrupèdes ovipares, crocodiles, lézards, tortues, ont les pattes tournées de côté, afin de pouvoir entrer plus facilement dans les trous où ils vivent, et pour que l'incubation des œufs leur soit plus aisée « *chez tous les animaux à pieds multiples, les flexions se font de côté, comme aussi chez les quadrupèdes qui gîtent dans des trous [...]* » ¹⁵³.

On peut voir encore une intention du même genre dans la conformation des polypodes, c'est-à-dire des animaux qui ont plus de quatre pieds ; leurs antérieurs, qui dirigent le mouvement, sont droits ; ceux de derrière, qui ne font que suivre la direction des premiers, sont obliques et légèrement cagneux. La locomotion des langoustes et celle des crabes mériteraient une étude spéciale. Chez les oiseaux palmipèdes, les pieds, armés de leurs membranes, sont des nageoires avec les pattes courtes, parce qu'elles sont placées en arrière, afin que la propulsion soit efficace.

La raison explique très bien pourquoi les oiseaux nageurs ont des pieds, et pourquoi les poissons n'en ont pas. Les oiseaux nageurs, tout en nageant fréquemment, doivent pouvoir marcher sur le sol, tandis que les poissons ne doivent vivre que dans le liquide. Ils ne respirent pas d'air, comme les oiseaux ; c'est l'eau qu'ils respirent ; leurs nageoires et leur queue correspondent aux ailes et aux pieds des volatiles, et en font l'office très suffisamment.

On pourrait pousser plus loin ces rapprochements entre les diverses classes d'animaux ; mais sur les êtres inférieurs, comme les crustacés par exemple, l'observation reste très difficile. Tenons-nous-en donc aux études précédentes, qui nous apprennent

¹⁵² MA. Chap. XV. Paragraphe 1, p. 36.

¹⁵³ MA. Chap. XVI. Paragraphe 4, p. 38.

ce qu'est la locomotion chez les animaux supérieurs, et qui préparent naturellement d'autres études dont l'âme peut être l'objet.

6. La marche

La marche est une activité d'une extrême complexité. Il suffit de regarder un jeune enfant s'essayer à cette activité nouvelle, et l'on se rend compte des difficultés que doit surmonter le marcheur en puissance. Aristote explique cette difficulté d'une autre manière. Il fait référence à des principes mécaniques, notamment dans ce cas, à une répartition défavorable des masses : « *Ce fait est d'ailleurs confirmé par ce qui se produit chez les jeunes enfants : ils ne peuvent pas marcher debout, parce qu'ils ont tous la forme de nains et que les parties supérieures de leur corps sont plus grandes et plus fortes que celles du bas.* »¹⁵⁴ La marche est une activité très ancienne, sa compréhension et son étude aussi. Les plus antiques signes restent enfouis sur des céramiques ou dans les sols. Les découvertes d'une expédition anthropologique réunissant des Éthiopiens, des Français et des Américains dans la vallée de l'Afar indiquent que l'homme marchait il y a trois millions d'années. La marche est une activité qui subit de nombreuses modifications selon le milieu, la charge et l'activité des personnes considérées. En se limitant à l'aspect cinétique de l'analyse, l'observateur considère que l'être humain ou l'animal déplace son corps d'un point à un autre. Le corps peut être assimilé à une masse, dans l'explication d'Aristote, le centre de gravité reste central. Il est soumis à des translations imprimées par les membres inférieurs et subit l'action de la pesanteur, de l'inertie et de l'accélération. Les résistances à vaincre lors de ce déplacement entraînent une dépense d'énergie, la plus faible possible si le sujet entend marcher loin et longtemps¹⁵⁵. Suivant Aristote, les principes du mouvement de translation (*per locum*) sont l'impulsion et la traction. Les animaux se meuvent par tout le corps à la fois ou par parties comme dans la marche. Les athlètes sautent plus fort s'ils portent des haltères que s'ils n'en portent pas, et les coureurs se meuvent plus vite s'ils agitent les bras. Il y a un effort pour étendre la main et les jointures. Ce qui est mu l'est toujours par le moyen de deux parties organiques dont l'une comprime l'autre¹⁵⁶. Aristote traite ensuite des choses étrangères à la marche de l'homme et des animaux, et au Chap. IX, il cherche à démontrer qu'il est dans la

¹⁵⁴ MA. Chap. XI. Paragraphe 2, p. 30.

¹⁵⁵ Plas F., Viel É., Blanc Y. *La marche humaine. Kinésiologie dynamique, biomécanique et pathomécanique*. Paris : Masson, 1979.

¹⁵⁶ *ibid.*

marche des parties qui se reposent, tandis qu'il en est d'autres qui se meuvent. Il n'y ajoute ni progression, ni vol ; ni nager sans flexion. Tout ce qui a des pieds se tient tour à tour sur l'une des deux cuisses, mais avec la nécessité de fléchir l'une tandis que l'autre s'avance, car les membres opposés sont égaux en longueur. Aussi, de ce fait, il devient nécessaire que ce qui repose s'infléchisse dans le jarret ou comme si l'animal qui marche manque de genou.

7. Le centre de gravité

Si l'on reprend le raisonnement d'Aristote dans le chapitre VI de la Marche des animaux quand il dit : « *Le principe commun d'où part le mouvement dans l'animal est le même que celui de la droite et de la gauche, ainsi que du haut et du bas, et il faut d'autre part que ce principe soit en chaque être aussi près que possible de chacun des principes qui se trouvent dans les parties en question [...]* »¹⁵⁷ ne permet-il pas d'envisager dans ce principe commun, celui de centre de masse du corps, à vrai dire celui de centre de gravité. Une notion, un concept qui sera repris par les plus grands savants de l'Antiquité et de la Renaissance, pour en devenir aujourd'hui un point essentiel dans l'étude de la locomotion de tous les animaux. Dans leurs études de la statique, de l'équilibre et du mouvement, Archimède¹⁵⁸, De Vinci¹⁵⁹, et Borelli¹⁶⁰ se sont efforcés d'en comprendre toute l'importance. La première question qu'Aristote envisage de préciser est directement associée à celle de centre de pression par l'intermédiaire du nombre d'appuis « *Mais précisons d'abord quelles sont les questions à examiner. La première est de savoir avec combien de points d'appui au minimum les animaux se meuvent* »¹⁶¹, qui sera traduit par « *Un premier point qu'il faut fixer, c'est le minimum des appareils par lesquels les animaux ont la possibilité de se mouvoir.* » selon Barthélemy Saint-Hilaire. Nous préférons la traduction faisant référence à la notion d'appui plus que d'appareil, car l'association avec celle de segment osseux ou de membre pourrait sous-entendre la notion de levier articulaire. Ce qui ne sera pas le cas puisque ni le mot levier, ni le mot force ne sont relevés dans le Traité selon les traductions en français.

¹⁵⁷ MA. Chap. VI. Paragraphe 6, p. 20.

¹⁵⁸ Ver Eecke P. *Les œuvres complètes d'Archimède. Suivies des commentaires d'Eutocius d'Ascalon.* [Notamment la partie intitulée « De l'équilibre des plans ou des centres de gravité des plans » ainsi que le Commentaire sur cette partie]. Liège : Vaillant-Carmanne, 1960.

¹⁵⁹ De Vinci L. *Les carnets de Léonard de Vinci.* Traduit de l'italien par Louise Servigen. Abbeville : Librairie Gallimard, 1942.

¹⁶⁰ Maquet P. *On the Movement of Animals.* [Traduction De motu animalium. Borelli A. Rome (1680 1st part) and (1681 2nd)]. Berlin : Springer, 1989.

¹⁶¹ MA. Chap. I. Paragraphe 2, p. 12.

8. Des points d'appui pour pousser et tracter

Aristote utilise les termes de poussée et de traction : « *il faut ajouter en outre que les principes des mouvements de locomotion sont la poussée et la traction* »¹⁶². En effet : « *L'être qui se met en mouvement utilise toujours au minimum deux organes pour opérer son déplacement, l'un qui pour ainsi dire comprime et l'autre qui est comprimé* »¹⁶³, pour caractériser la force qui va s'exercer sur le point d'appui « *[...] l'être qui se meut change de lieu en s'appuyant toujours sur le support qui est au-dessous de lui.* »¹⁶⁴. C'est à partir d'un point d'appui et de l'action poussée ou de l'action traction que le déplacement peut se réaliser, sous la forme d'une flexion et/ou d'une extension : « *Voici maintenant ce qui montre qu'il n'y aurait ni flexion ni extension s'il n'y avait rien d'immobile. En effet, la flexion est, à partir d'une ligne droite, son changement en courbe ou en angle ; l'extension est la transformation de l'un ou de l'autre en ligne droite. Dans tous les changements en question, la flexion ou l'extension concernent nécessairement un point d'appui déterminé.* »¹⁶⁵

Il est vrai qu'en abordant la locomotion depuis les organes Aristote met en évidence l'architecture de son raisonnement mécaniste explicatif : « *En ce qui concerne les organes dont les animaux se servent pour se rendre d'un lieu à un autre, il faut examiner pour quelle raison chacun d'eux est ce qu'il est, et en vue de quelle fin les animaux les possèdent.* »¹⁶⁶ Par l'agencement d'un à plusieurs membres s'appuyant et s'articulant de façon concave ou convexe la flexion ou l'extension crée le mouvement. L'étude de la locomotion fait référence à des notions biomécaniques où le fonctionnement des organes est analysé pour sa finalité locomotrice. Les segments et repères anatomiques localisables et localisés (pieds, jambes, bras, genoux, hanches...) se combinent avec des paramètres et valeurs mécaniques de positions (haut - bas, avant - arrière, droite - gauche, milieu, point d'appui) et de déplacements quantifiables (flexion, extension, angle, diagonale). Autant d'éléments favorables pour l'élaboration d'une classification bipédique, quadrupédique ou autres, d'animaux sanguins et non sanguins.

9. Un déplacement à moindre coût selon les dimensions de l'espace

Aristote fait référence encore à la notion du déplacement au moindre coût, ce qui constitue la trame encore actuelle de la majeure partie des recherches en physiologie de

¹⁶² MA. Chap. III. Paragraphe 4, p. 14.

¹⁶³ MA. Chap. III. Paragraphe 5, p. 14.

¹⁶⁴ MA. Chap. III. Paragraphe 1, p. 14.

¹⁶⁵ MA. Chap. IX. Paragraphe 1, p. 25.

¹⁶⁶ MA. Chap. I. Paragraphe 6, p. 13.

l'effort et biomécanique du mouvement. Que peut devenir un mouvement optimal pour un déplacement à moindre coût ? Car : « *L'un de ces principes est que la nature ne fait rien en vain, mais réalise toujours le meilleur parmi les possibles qui correspondent à l'essence de chaque animal.* »¹⁶⁷. L'évolution de la locomotion suivrait-elle celle de la moindre dépense énergétique comme l'évoque Josef Reichholf¹⁶⁸. Ses hypothèses visent à inciter le lecteur à réfléchir sur l'origine de la mobilité, ainsi que sur notre propre comportement du point de vue de la vitesse et de l'énergie. Il est intéressant à noter par exemple que la phase de transition locomotrice de la marche à la course se fait sur le registre du moindre coût énergétique¹⁶⁹. La locomotion serait depuis l'origine, une sorte de force motrice de l'évolution où la conversion, réalisée avec le meilleur rendement possible, de l'énergie absorbée ou stockée en locomotion serait essentielle, tout comme certains rapports anthropométriques de masses et de tailles segmentaires favorables.

Aristote introduit dans le traité des considérations sur « les dimensions de l'espace » comme pour mieux décrire et décomposer analytiquement le mouvement. En effet, le biomécanicien s'assure qu'un corps est en mouvement si sa position par rapport à des repères fixes varie avec le temps. Aristote distingue « [...] *six dimensions réparties en trois séries : la première comprend le haut et le bas, la seconde le devant et le derrière, la troisième la droite et la gauche* »¹⁷⁰. Que ce soit pour l'anatomiste ou le mécanicien, le mouvement est apprécié par rapport à ces trois dimensions de l'espace. Plus exactement, le mécanicien se réfère à trois axes orthogonaux, de même origine, ce qui constitue les repères galiléens. Selon ces repères fixes, il s'assure du mouvement du corps, en appréciant si sa position varie avec le temps. Les positions successives que l'objet occupe constituent sa trajectoire conséquence directe de forces. Pour l'anatomiste, les mouvements peuvent être appréciés en correspondance aux trois plans de l'espace euclidien, selon notre vue intuitive de l'espace, ou simplement par l'organisation de notre oreille interne de trois canaux semi-circulaires qui concrétisent ces espaces. C'est ainsi que se distinguent, un

¹⁶⁷ MA. Chap. II. Paragraphe 2, p. 134.

¹⁶⁸ Reichholf J. H. *Mouvement animal et évolution : courir, voler, nager, sauter*. Paris : Flammarion. 1994.

¹⁶⁹ Durand M. et al. Etude des concomitants énergétiques de la transition marche-course. In Laurent M. et al. *Recherches en APS 3*. Paris : Editions Actio / Université Aix-Marseille II, 1992. (Les recherches sur les exercices musculaires montrent que dans des situations non contraignantes les sujets adoptent une vitesse et une foulée (fréquence / amplitude) de marche et de course optimale, c'est-à-dire correspondant à une dépense énergétique minimale. Leur étude « **pour l'essentiel, les résultats montrent que la transition marche - course s'opère selon une modalité d'optimisation : le changement de coordination ou de programme moteur correspond à une minimisation de la dépense énergétique exprimée en terme de consommation d'oxygène ou de fréquence cardiaque** »).

¹⁷⁰ MA. Chap. II. Paragraphe 3, p. 14.

plan horizontal, et deux plans verticaux respectivement un frontal et un sagittal. C'est en fonction de ces plans que l'anatomiste décrit encore un muscle adducteur selon l'axe du corps, ou rotateur, par rapport à l'axe du membre, ou encore fléchisseur en référence au segment sus-jacent.

Tout au long du traité, Aristote articule ses connaissances sur l'anatomie et sur la mécanique pour mieux saisir les causes du mouvement. La sémantique biomécanique que l'on relève souligne l'association du corps vivant comme à un mécanisme, au modèle élémentaire de l'automate dont il faut comprendre les lois. La connaissance et la maîtrise de la mécanique se révéleront essentielles pour mieux appréhender la biologie de la locomotion.

10. De la mécanique à la physiologie

Les premières études approfondies de physiologie animale ont été probablement entreprises environ 300 ans avant Jésus-Christ par les médecins et anatomiste grec de l'école d'Alexandrie, Hérophile d'Alexandrie et Érasistrate qui réalisèrent, d'après les références de Galien au II^e siècle, des dissections et des expériences en public sur les animaux et les hommes notamment sur le rôle de la circulation sanguine et le système nerveux¹⁷¹. Leurs manuscrits, à l'exception de quelques petits fragments, ont aujourd'hui disparu. Hérophile différencie déjà le système nerveux des tendons et des artères, considérant le cerveau comme le siège de la pensée. Il manifestait un rejet profond de toute théorie qui ne se fondait pas sur la pratique et sur la connaissance de choses visibles, révélant lors de ses dissections les organes du corps humain progressivement comme pour le démontage d'une machine. Érasistrate à la limite de la compréhension de la circulation sanguine, décrit les artères et les veines en pensant qu'elles communiquent entre elles. Il envisagea le transport par le sang et les nerfs distingués sensoriels ou moteurs, un esprit vital du cœur jusqu'au cerveau, dont il note les circonvolutions. Il est intéressant de remarquer que l'enfant avant la naissance devait être considéré comme un animal dont le statut changeait quand il recevait une âme lors de sa naissance, lors du premier souffle de vie, en relation sans doute avec la prise de position sur une quantité d'air qui occupée une partie des artères. On cite de lui une expérience consignée dans un papyrus retrouvé en Égypte qui n'est pas sans nous rappeler celle de Santorio Santorio quelques siècles plus tard : « *Si on enferme (après l'avoir*

¹⁷¹ Lloyd G. E. R. *La Science grecque après Aristote*. Paris : Ed. La Découverte, 1990, p. 93-99.

Partie I. Chapitre 2. Aristote : Les principes du déplacement animal

pesé) un oiseau ou un autre animal semblable dans un récipient en métal en le laissant plusieurs jours sans nourriture et si ensuite on le pèse de nouveau avec tous ses excréments, évacués comme substance visible, on trouve un poids beaucoup plus faible que le poids antérieur. Cela vient du fait qu'il y a eu une forte volatilisation de substance qui ne peut être reconnue que par un raisonnement. »¹⁷² Ces deux médecins qui engendrèrent deux écoles sur des voies résolument expérimentales et scientifiques autour de problématiques anatomiques et physiologiques subsistèrent jusqu'au II^e siècle de notre ère environ.

¹⁷² Bonnard A., Detienne M. *Civilisation grecque d'Euripide à Alexandre*. Paris : éditions Complexe, 1991, p. 766.

Chapitre 3. Quelques Compromis théoriques sur la progression animale

1) L'Antiquité

1. Lucrèce

Ce poète est particulièrement intéressant pour son interprétation des principes de l'expérience humaine selon une approche philosophique épicurienne des connaissances supposées authentiques de l'Univers. Dans l'extrait du Livre IV sur *La marche et le mouvement*, *De rerum natura* dévoile une certaine conception du mouvement depuis son image (sa pensée) jusqu'à son exécution mécanique.

*Mais comment nous pouvons marcher quand nous le voulons,
donner à nos membres les divers mouvements,
quelle force déplace tout le poids de notre corps,
je le dirai maintenant, et toi écoute-moi.*

*Je dis que des **images du mouvement** viennent d'abord
marteler notre esprit, comme nous l'avons dit plus haut.*

*Puis naît la volonté, car nul ne commence rien
si l'esprit auparavant n'a vu ce qu'il veut faire.*

Cette prévision consiste en l'image de l'acte.

*Quand donc l'**esprit** se meut de manière à vouloir
aller et s'avancer, il frappe aussitôt l'**âme***

*à travers tout le corps et l'organisme éparse,
chose facile en raison de leur union étroite.*

*Puis l'âme à son tour frappant le **corps**, ainsi toute
sa **masse** est de proche en proche ébranlée.*

*En même temps le **corps se raréfie et l'air**,*

*comme l'exige évidemment sa nature mobile,
s'engouffre et pénètre à flots par les conduits béants,
se dispersant ainsi dans les moindres recoins.
Ces deux facteurs agissants donc de part et d'autre,
le corps est poussé comme un navire par vents et voiles.
Il n'est pas étonnant que d'infimes **corpuscules**
puissent manœuvrer un corps aussi grand,
mouvoir, faire tourner notre poids tout entier.
Le vent, avec son corps subtil, le vent tenu
pousse un grand navire et son grand chargement
quand une seule main régit sa course impétueuse,
quand un seul gouvernail le fait tourner à son gré;
au moyen de poulies et de grues, une machine
meut et soulève d'un léger effort les plus grands poids.*

Figure 12. Lucrèce. ¹⁷³

Déjà dans ce texte de Lucrèce, dont les spécialistes de l'étude du mouvement sont rares à aborder ou même à citer bien qu'il constitue une introduction à la conceptualisation du mouvement, depuis sa représentation imagée cérébrale à la mise en action effectuée musculairement et guidée par un squelette fait de poulies et de grues.

¹⁷³ Lucrèce. *De rerum natura (De la nature)*. Traduction, introduction et notes de José Kany-Turpin. [Livre IV. La marche et le mouvement]. Paris : Aubier, 1993. p. 291-293.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

Un texte historique métablétique¹⁷⁴ où toute la sémiotique des théories locomotrices est présente et sera discutée au cours des siècles suivants autour des concepts sur les esprits animaux, les âmes, les corpuscules et bien d'autres hypothèses développées depuis les machines simples classées en huit catégories : levier, roue, poulie, coin, plan incliné, vis, engrenage, treuil, permettant de transformer une force déterminée en valeur et en direction dans le développement d'une autre. « *La renaissance de la philosophie expérimentale fait de Lucrece un contemporain. Il semble que l'antique poète de la nature, longtemps retiré dans sa gloire solitaire, en dehors et au-dessus d'un monde livré aux fureurs du mysticisme, aux stériles querelles de la scolastique, aux froides rêveries de la métaphysique, redescende enfin parmi nous, pour s'associer au triomphe définitif de la science.* »¹⁷⁵

2. Pline l'ancien

L'écrivain collecte et consigne dans son encyclopédie *l'Histoire naturelle* (*Naturalis historia*)¹⁷⁶ en trente-sept volumes les connaissances scientifiques et techniques sur tous les domaines du savoir de son époque notamment les sciences naturelles pour ce qui nous concerne. Seule œuvre conservée, de cet auteur prolifique, une partie seulement traite véritablement d'histoire naturelle sur les animaux terrestres, les poissons, les oiseaux, mais aussi les insectes. Stoïcien sous l'influence de Sénèque (4 av. J.-C. - 65 ap.), mais aussi épicurien et pythagoricien, son encyclopédie suit une démarche où la raison et la nature conduisent à la sagesse et au bonheur comme ataraxie, mais aussi comme propagation de la connaissance à ses contemporains.

Son œuvre dédiée à l'empereur Romain Titus, constitue avant tout un recueil inépuisable de renseignements sur les connaissances scientifiques des anciens. Véritable encyclopédie de son temps, l'ouvrage fruit d'un labeur incessant de lectures et de recueils d'informations, rassemble le vrai et le faux en proportion équivalente. Pline ne conforte malheureusement pas ses notes à la critique de l'observation et de l'expérimentation comme Aristote. Concernant les mécanismes de la marche, de la nage et du vol qu'il aurait pu décrire dans les livres proposés sur les animaux, rien n'est dit (Livre VIII, traitant de la nature des animaux terrestres [84 chapitres]. Livre IX,

¹⁷⁴ C'est un terme qui désigne des changements qui surviennent simultanément dans divers domaines. Le mot est une dérivation du verbe grec *metabolein*, d'où vient notre mot pour métabolisme.

¹⁷⁵ Lucrece. *De Rerum Natura (De la nature des choses)*. Traduction complète en vers français avec une préface et des sommaires d'André Lefèvre. Paris : Société d'éditions littéraires, 1899, préface.

¹⁷⁶ Pline l'ancien. *Histoire Naturelle*. Edition d'Emile Littré. Paris : Dubrochet, 1848-1850.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

contenant les animaux aquatiques [88 chapitres]. Livre X, contenant l'histoire des oiseaux [98 chapitres]. Livre XI, traitant des insectes [119 chapitres]).

Selon le jugement de Cuvier (Biographie universelle, tome XXXV) « *C'est, en un mot, un auteur sans critique, qui, après avoir passé beaucoup de temps à faire des extraits, les a rangés sous certains chapitres, en y joignant des réflexions qui ne se rapportent point à la science proprement dite, mais offrent alternativement les croyances les plus superstitieuses, ou les déclamations d'une philosophie chagrine qui accuse sans cesse l'homme, la nature, et les dieux eux-mêmes. Si Pline a pour nous aujourd'hui peu de mérite comme critique et comme naturaliste, il n'en est pas de même de son talent comme écrivain, ni du trésor immense de termes et de locutions latines dont l'abondance des matières l'a obligé de se servir, et qui ont fait de son ouvrage l'un des plus riches dépôts de la langue des Romains...* ».

Sans participer à l'avancement des sciences naturelles par ses études spécifiques, le recensement et la compilation encyclopédique laborieuse des résultats de ses prédécesseurs dont les livres sont aujourd'hui à jamais perdus, reste un patrimoine inestimable pour tout historien. *L'Histoire naturelle* de Pline a été pendant des siècles la principale et même la seule source d'où l'on puisa quelques notions de cette science, l'ignorance de la langue grecque empêchant de recourir aux écrits d'Aristote, de Théophraste et de Discoride. Les quelques extraits suivants sont un aperçu des connaissances transmises tout au long des 37 volumes qui exposent des notions sur le monde, la terre, le soleil, les planètes et les propriétés remarquables des éléments et ensuite la géographie, explicitent l'histoire naturelle, des animaux terrestres, des poissons, des oiseaux et des insectes entre autres.

Livre VIII. Traitant de la nature des animaux terrestres. V. De l'instinct des bêtes pour comprendre les dangers qui les menacent. LXVII. Génération des chevaux.

V. [...] Les éléphants marchent toujours en troupe ; le plus âgé conduit la bande, le plus âgé ensuite ferme la marche ; quand ils passent une rivière, ils envoient devant les plus petits, de peur que les pieds des plus grands n'enfoncent le lit et n'augmentent la profondeur de l'eau. [...]

LXVII. [...] Dans la même Espagne, la Galicie et l'Asturie produisent des chevaux de l'espèce que nous appelons thieldons, et astureons quand ils sont plus petits. Ces chevaux n'ont pas une marche ordinaire, mais leur allure est douce, et résulte du mouvement simultané des deux jambes d'un même côté ; c'est d'après eux qu'on est parvenu à dresser les chevaux à aller l'amble. [...]

Livre IX, Contenant les animaux aquatiques. XXXVII. Des nageoires des poissons, et de leur manière de nager.

[1] Aussi les nageoires qui servent de pieds aux poissons présentent-elles des différences : aucun n'en a plus de quatre, quelques-uns en ont deux, d'autres n'en ont point. Dans le lac Fucin seulement est un poisson qui nage avec huit nageoires. Les poissons longs et glissants, comme les anguilles et les congres, n'en ont absolument que deux ; les murènes n'en ont pas, elles sont dépourvues aussi de branchies. Tous cheminent dans la mer en donnant à leur corps des mouvements ondulatoires, comme les serpents cheminent sur terre. Ils rampent aussi étant à sec ; à quoi ils doivent d'être plus vivaces. Parmi les poissons plats quelques-uns n'ont pas de nageoires,

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

par exemple, les pastenagues, qui se soutiennent par leur seule largeur. Les animaux qu'on appelle mous, tels que les poulpes, n'ont pas non plus de nageoires ; leurs pieds leur en tiennent lieu.

Livre X. Contenant l'histoire des oiseaux. Chapitre LIV. Différences dans le vol et dans la marche.

« Le vol des pigeons me fait songer à parler aussi du vol des autres oiseaux. Le reste des animaux a une démarche déterminée, qui est toujours la même pour chaque espèce : les oiseaux seuls ont deux manières de se mouvoir, une sur la terre, et l'autre dans l'air. Quelques-uns marchent, comme les corneilles ; d'autres sautent, comme les moineaux et les merles ; courent, comme les perdrix et les bécasses ; jettent un pied en avant, comme les cigognes et les grues. Dans le vol, les uns étendent les ailes, et, planant, ne les meuvent qu'à de rares intervalles ; les autres les meuvent plus souvent, mais ils n'en font aller que l'extrémité ; d'autres déploient toute leur envergure ; quelques-uns volent en serrant en grande partie leurs ailes : après avoir frappé l'air une fois, et d'autres deux fois, ils s'enlèvent comme pour comprimer l'air renfermé sous leurs ailes, et s'élancent dans une direction verticale, horizontale ou oblique. Il y en a qui semblent être lancés ; d'autres paraissent tomber du haut des airs, d'autres bondir. [2] Les canards et les oiseaux de même espace s'élèvent seuls immédiatement en haut, et gagnent aussitôt le ciel, et cela même en partant de la surface de l'eau ; aussi sont-ils les seuls qui s'échappent des fosses dans lesquelles on prend les bêtes fauves. Le vautour et les oiseaux pesants ne peuvent prendre leur vol qu'en se donnant de l'élan par la course, ou en s'élançant du haut d'un tertre. La queue sert de gouvernail (X, 12). [3] Il en est qui voient tout autour d'eux, d'autres qui tournent le cou pour regarder ; quelques-uns mangent en l'air la proie saisie avec les pattes ; beaucoup ne voient pas sans crier, ou, au contraire, sont toujours silencieux pendant le vol. Ils volent droits, penchés, de travers, sur le côté, la tête en bas, quelques-uns même sur le dos ; [4] à tel point que, si on en voit plusieurs espèces ensemble, elles ne paraissent pas cheminer dans le même élément.

Livre XI, Traitant des insectes. CV. De la marche : des pieds et des jambes.

« Tous les animaux se mettent en marche par le côté droit, et se couchent sur le côté gauche. Tandis que les autres font leurs pas comme ils veulent, le lion et le chameau, seuls, marchent de façon que le pied gauche ne dépasse pas le pied droit, mais reste en arrière. L'homme a les pieds les plus grands ; dans toutes les espèces les femelles les ont plus petits. L'homme seul a des mollets, et les jambes charnues. On trouve dans les auteurs qu'un certain Égyptien n'avait pas de mollets. L'homme seul a une plante de pied ; quelques individus en sont dépourvus. De là on a tiré des surnoms, Plancus (pied plat), Plautus (pied plat), Scaurus (pied bot), Pansa (pied large), de même que de la configuration des jambes ceux de Varus (banca), de Vacia (cagneux), de Vatinius (jambe tortue) ; vices de conformation qu'on voit aussi chez les quadrupèdes. »

Les mouvements progressifs, expliqués d'abord par Aristote, Galien, Fernel, Vinci, Borelli et d'autres demanderont des observations précises pour être suffisamment connus. Pendant ces périodes, il y a vraiment lieu d'être surpris que l'on se soit si peu occupé des mouvements progressifs (notamment de la marche) si remarquables chez l'homme, où ils s'opèrent sur deux de ses membres seulement ; si rapides dans la course de quelques quadrupèdes, et si étonnants dans le vol des oiseaux et des insectes, où ces animaux n'emploient aussi que deux de leurs membres. Tous ces mouvements admirables, exécutés si facilement, qu'ils semblent un jeu pour la plupart des animaux, n'ont jamais excité d'attention suffisante de la part des savants.

On a cru longtemps que les juges naturels dans l'étude du mouvement devaient correspondre aux profils d'anatomistes ; mais la plupart de ces savants n'étaient pas mécaniciens, par la raison que l'anatomie par son importance, par l'immensité de ses détails, par les découvertes sur l'organisation contenta les savants à occuper tout leur temps. Cependant l'avancée des idées sur les études de la locomotion a conduit

l'expérimentaliste à connaître la mécanique pour juger et approfondir nos mouvements. En effet, les connaissances anatomiques nécessaires pour comprendre les mouvements progressifs, peuvent se borner aux muscles de la locomotion, à quelques parties du squelette, au jeu des os des membres principalement, le reste se révèle du domaine de la physiologie et de la mécanique. Ainsi l'étude particulière et approfondie de la physiologie et de la mécanique des mouvements a préparé l'avenir des avancées utiles.

L'historique de la locomotion pourrait se diviser schématiquement en deux grandes périodes, l'une d'observation et l'autre d'expérimentation. La première qui s'étend depuis Aristote, jusqu'aux frères Weber, peut-être subdivisée en trois phases principales que nous allons successivement passer en revue. Une phase pendant laquelle la métaphysique, régnant en souveraine, venait en aide à l'insuffisance des connaissances anatomiques. Dans l'étude des mouvements, on commença par croire que la volonté agissait directement pour les produire ; puis on fit intervenir, comme instruments intermédiaires, les *esprits animaux* qui servaient à établir une communication entre l'esprit et la matière. La seconde dite anatomique commence avec Galien de Pergame qui, dans un ouvrage sur la dissection des muscles ; décrit la plupart de ces organes en indiquant leurs principaux usages. Son traité *De usu partium* contient quelques détails intéressants sur la locomotion, mais l'auteur prend souvent pour guide la théorie des causes finales, qui l'entraîne loin de la vérité. Une troisième phase dite, iatomécanique, jusqu'à cette période la locomotion n'est pas encore nettement définie et l'on ne voit intervenir dans le problème aucune considération sur la force motrice, le point d'appui du corps ou les résistances à vaincre. En s'adressant à ces éléments. Borelli va inaugurer une ère nouvelle que l'on peut appeler la phase mécanique de la période d'observation, initiée par la mathématisation de la technique de la fin du XVI^e et du début du XVII^e siècle. En effet, « désormais, ce qu'on cherche ce sont moins des tables approximatives, capables de fournir un résultat pratiquement utilisable, où les erreurs étaient négligeables, que des formules qui permettent, pour un ensemble de données, de construire « le » résultat cherché »¹⁷⁷.

La plupart des animaux sont organisés pour exécuter des mouvements de translation d'un point à un autre. Ces mouvements de translation constituent la locomotion. Considérée dans son sens le plus étendu, c'est-à-dire comme signifiant la faculté qu'ont les animaux de pouvoir à volonté se transporter d'un lieu à un autre¹⁷⁸,

¹⁷⁷ Gille B. *Les ingénieurs de la Renaissance*. [Herman, 1964] Paris : Seuil, 1978, p. 262.

¹⁷⁸ Brunot F. *Histoire de la langue française*. Paris : Armand Colin. T. I, 1904 (rééd. 1966); t. II, 1906 (rééd. 1967) : 161-2; t. III-1, 1909 (rééd. 1966) : 81-94, 262-71; t. IV-1, 1913 (rééd. 1966) : 25-49.

elle ne s'exécute pas de la même manière dans la série des animaux. Les modes de locomotion des êtres vivants sont d'une très grande diversité : marcher, ramper, sauter, arpenter, nager, voler... Ainsi l'homme, les quadrupèdes, certains reptiles et insectes marchent ; les oiseaux les chauves-souris et un grand nombre d'insectes volent, les poissons nagent ; les ophidiens¹⁷⁹, les vers rampent, etc. Plus spécifiquement, la locomotion signifie non seulement la faculté que possèdent les animaux de se transporter d'un lieu à un autre, mais encore la fonction en vertu de laquelle ils meuvent, sous la dépendance de leur volonté, ou leur corps en totalité, ou simplement quelques-unes de leurs parties. Elle est en quelque sorte le complément de la sensibilité dans le règne animal, puisque c'est par le moyen de leur faculté locomotrice que les animaux peuvent exécuter les différents mouvements qui doivent concourir à leur conservation. Depuis cette fonction, tous les milieux ont été conquis : l'eau, la terre, les airs, et, malgré leurs contraintes physiques respectives, des êtres vivants s'y déplacent.¹⁸⁰

Conscient de la continuité historique et de la valeur des apports de certains savants ou autres précurseurs que l'histoire a plus ou moins oubliés, il conviendrait de réactualiser et de tisser les liens avec l'histoire des courants disciplinaires et de pensées, pour faire émerger cette cohérence de la continuité. Concernant l'histoire de la biomécanique, il s'agirait de percevoir son origine dans les études sur la mécanique appliquée au vivant, mais aussi la biologie spécifique, l'anatomie appliquée à la fonctionnalité des organismes, la médecine et d'autres encore, autant souligner la difficulté de la tâche, en ce sens nous réduirons notre étude à certains penseurs et auteurs d'importances en relation au plus juste avec certaines notions et concepts présents dans le *De motu animalium* d'Aristote et dont l'intérêt s'est amplifié pour devenir indispensable dans l'étude du mouvement. L'approche hagiographique (écrits sur la vie) de cette science « *anatomo-physico-fonctionnelle* » autour de penseurs clefs, étudie ce que Victor Hugo appelait « *les admirables à peu près de la science* »¹⁸¹, où les tâtonnements, les erreurs et les échecs sont autant d'améliorations de la compréhension du vivant.

¹⁷⁹ Ordre des reptiles comprenant les serpents.

¹⁸⁰ Axis l'univers documentaire Hachette. Dossiers. *La locomotion des êtres vivants*. Bagnaux, le livre de Paris - Hachette, c1993, Volume 6. p. 224-228.

¹⁸¹ « *L'art marche à sa manière ; il se déplace comme la science ; mais ses créations successives, contenant de l'immuable, demeurent ; tandis que les admirables à peu près de la science, n'étant et ne pouvant être que des combinaisons du contingent, s'effacent les uns par les autres.* » in Hugo V. *William Shakespeare*. [Première partie. Livre III. L'art est la science. Paris : Librairie internationale, 1864, p. 136.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

Même si Aristote étudia la locomotion sans connaître l'action des muscles dont il ignorait la notion même (il ne connaissait que les « chairs ») et qu'il confondait nerfs, tendons et ligaments articulaires, l'étude de sa démarche se révèle intéressante. Il croyait que les mouvements de flexion et d'extension étaient produits par les esprits animaux qui, arrivés dans les articulations, attiraient les os ou les repoussaient, ce qui se perpétua pendant des siècles sous différentes logiques. C'était à Erasistrate, petit fils d'Aristote, qu'était réservée la gloire de mettre en avant une logique grossière de la contraction musculaire. La marche et la course ont fait l'objet de nombreuses recherches, mais on a toujours manqué et d'expériences pour décrire ces mouvements d'une manière conforme à la nature, et de mesures exactes sur lesquelles établir des théories. L'étude de la marche de l'homme a fixé au cours de l'écoulement du temps historique les hommes de science et de philosophie. Aristote et Galien, plus tard Fabrice d'Acquapendente, Gassendi et Borelli, parmi les modernes, enfin, Haller, Barthez, Magendie, Roulin, Gerdy, Krause, Poisson¹⁸² pour d'autres siècles, en ont fait le sujet de leurs recherches, mais ils ne sont pas les seuls, d'autres plus effacés, ont apporté leurs connaissances et leurs hypothèses à l'édifice des savoirs.

3. Claude Galien

Il faut souligner l'apport de l'un des médecins, qui exerça, sur la connaissance du corps et de son mouvement, la plus durable influence, c'est-à-dire Claude Galien et dont l'anatomie plus animale qu'humaine restera plusieurs siècles sous la dépendance de son œuvre. En effet, il a, comme le dit Georges Canguilhem « *identifié le muscle comme organe du mouvement volontaire et localisé l'origine fonctionnelle de ce mouvement dans le cerveau où les nerfs ont leur origine anatomique* »¹⁸³. Auteur des seize livres *De fabrica partium corporis humani* et des quinze livres *De anatomicis administrationibus*, il avait la conviction que tous les animaux vivants suivaient un même principe unique et omniprésent, considérant que ce qui se trouve dans le corps d'un singe, d'un homme, d'un porc n'est pas fondamentalement différent même si cela ne correspond pas à la même chose. En marge de ces appareils biologiques visibles par la dissection, et responsables de la locomotion Galien suppose pour son explication motrice l'existence d'une force interne, présente en chacun de nous, qui meut le corps par l'intermédiaire de ce que l'on appellera plus

¹⁸² Poisson S. D. *Traité de mécanique*. [2^e éd., considérablement augmentée par rapport à 1811]. Paris : Bachelier 1833, tome II, p. 759-761.

¹⁸³ Canguilhem G. *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris : PUF, 1955, p. 14.

tard les « *esprits animaux* » et qui, porte, chez Galien le nom de « *pneuma* » qui signifie le souffle.

Il aborde l'étude de l'homme par les parties qui le distinguent d'autres animaux et prend véritablement la méthode à rebours ; il examine les appendices avant les parties essentielles de l'animal. À côté de cette grave imperfection, on trouve dans les œuvres anatomiques de Galien des perfectionnements remarquables dans la description. En effet, il apporte des contributions sur le squelette humain et sur les muscles, reconnaissant sept des douze paires de nerfs crâniens. L'histoire note que Galien, désirent expliquer le mécanisme de la locomotion et prouver que les muscles y jouent un rôle actif, avait coutume d'exposer sur un animal les muscles extenseurs et fléchisseurs d'un membre ; il montrait ensuite comment la tension et le relâchement alternatifs des faisceaux musculaires mettent en jeu les os à la façon de leviers.¹⁸⁴ Cette vision mécaniste, inaugurée par Galien dans le *De motu musculorum* et prolongée par Descartes, culminera dans le monde médical chez les iatrophysiciens comme Giovanni Alfonso Borelli au siècle suivant dont la rédaction du *De motu animalium* en représente une synthèse sur certains aspects. Il convient de souligner que Galilée et Kepler s'interpellèrent aussi, au début du XVII^e siècle sur la question de savoir si les mouvements du corps étaient par nature circulaires à l'image du monde céleste ou linéaire selon la conception du monde sublunaire (ou terrestre).

Ce n'est ni dans Aristote, ni dans Galien, qu'il faut chercher la théorie de la marche ; ils n'indiquent guère que le mouvement alternatif des membres inférieurs. En effet, suivant Aristote, les principes du mouvement de translation (*per locum*) sont l'impulsion et la traction. Les animaux se meuvent avec le corps entier à la fois ou selon les parties comme dans la marche. L'image des athlètes qui sautent plus loin s'ils portent des haltères que s'ils n'en portent pas est révélatrice, de même que les coureurs se meuvent plus vite s'ils agitent les bras. Il y a un effort pour étendre la main et les jointures. Ce qui est mu l'est toujours par le moyen de deux parties organiques dont l'une comprime l'autre. Aristote traite ensuite des choses étrangères à la marche de l'homme et des animaux, et au chapitre IX, il cherche à démontrer qu'il y a dans la marche des parties qui se reposent, tandis qu'il y en a d'autres qui se meuvent. Il n'y ajoute ni progression, ni vol ; ni nager sans flexion. Tout ce qui a des pieds se tient tour à tour

¹⁸⁴ Renouard P. V. *Histoire de la médecine depuis son origine jusqu'au XIX^e siècle*. Tome 1. Paris : J.-B. Baillière, 1816, p. 271.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

sur l'une des deux jambes, mais il est nécessaire de fléchir l'une tandis que l'autre s'avance, car les membres opposés sont égaux en longueur. Aussi ; par cela même, il est nécessaire que ce qui repose s'infléchisse.

Galien n'en dit pas plus qu'Aristote sur le plan descriptif de la marche, mais ce qui change radicalement avec Galien, c'est sa conception de l'élément moteur par l'anatomie du mouvement à savoir le muscle : « *Pourquoi donc n'appelons-nous pas le muscle organe du sentiment, mais uniquement organe du mouvement, quoiqu'il participe également aux deux fonctions ? Parce que les animaux n'auraient aucun mouvement volontaire sans les muscles, de sorte que le muscle est l'organe propre de ce mouvement, tandis que toutes les parties sensibles sont douées de sentiment sans l'intervention des muscles, car toute partie pourvue de nerfs est nécessairement douée de sentiment. Le muscle est donc, nous l'avons dit clairement, l'organe du mouvement volontaire. Nous avons dit aussi quel est le principe du mouvement du muscle, quels organes le lui transmettent, à savoir : l'encéphale et les nerfs. Nous avons dit encore comment, dans ce muscle, se distribuent les nerfs et les ligaments.* »¹⁸⁵ Dans ce court extrait, Galien expose déjà l'excitabilité musculaire, ses avancées expérimentales dans la dissection anatomique procurent un progrès anatomo physiologique sur la compréhension de la locomotion.

Dans son analyse de la marche, il remarque que, lorsque l'homme marche, la jambe qui le soutient porte plus du double du poids du corps qu'elle soutenait dans la station verticale. Il ajoute que, dans le transport de la jambe, les muscles qui fléchissent agissent plus que ceux qui étendent, et ils sont très tendus, car s'ils se relâchaient un peu, le corps tomberait. Bien qu'une grande partie de ses conceptions physiologiques se révèle souvent spéculative, ses descriptions anatomiques se réfèrent aux connaissances des œuvres de nombreuses dissections sur des cadavres humains d'Hérophile et d'Érasistrate ainsi qu'à sa pratique de la dissection sur des cadavres d'animaux proches de l'homme. Cette forte tendance à pénétrer les corps par couches analytiques de dissection, pousse Galien à s'intéresser aux détails du rôle des segments dans l'équilibre, le déplacement. En effet, pourquoi le pied possède cette dimension et ce rapport selon la taille des individus ? La voûte plantaire, mais aussi les orteils influencent la motricité dans la propulsion lors du déplacement. La flexion des jambes s'avère finalement le mécanisme essentiel pour mieux gérer l'équilibre et activer le mouvement depuis le point d'appui du pied.

¹⁸⁵ Daremberg C. *Galien. Œuvres anatomiques, physiologiques et médicales de Galien.* [VII. Du mouvement des muscles. Livre premier. Du mouvement des muscles. Livre second Tome 2.]. Paris : J.-B. Baillière, 1856.

Chez Galien, les explications anatomiques sont prépondérantes, mais encore éloignées des conséquences et interprétations mécaniques. Cependant, sa démarche inspire le champ scientifique de l'anatomie fonctionnelle depuis les limites des déplacements osseux jusqu'aux rôles des muscles. Par exemple, c'est la tête du fémur qui peut tourner en tous sens autour de son centre géométrique ou bien la cavité cotyloïde qui contribue à permettre une très grande variabilité de mouvements. En effet, selon les trois axes principaux, horizontal et transversal, horizontal et antéro-postérieur, mais aussi vertical se font les mouvements de grandes amplitudes de flexion et extension, adduction et abduction ainsi que rotation externe et interne. Depuis ces directions articulaires imposées, les muscles produisent des actions qui varient avec la position de l'articulation et les divers faisceaux de certains muscles qui peuvent avoir des actions diamétralement opposées selon les points de fixation articulaire, d'où une très grande complexité. En effet, le grand fessier peut être extenseur et rotateur externe vers le dehors, le petit fessier abducteur, mais aussi rotateur en dedans et le moyen fessier peut participer à la flexion, mais aussi à l'extension de la hanche. Au cours des multiples dissections, la structuration régulière de ces connaissances en principes, participent chez Galien et ses disciples à la compréhension analytique et anatomique du mouvement.

*« La nature a créé chez les animaux **les jambes comme organes de marche** ; elle en a donné quatre au cheval, au chien, à l'âne, au bœuf et à tous les autres animaux ; l'homme est le seul des animaux fait pour marcher qui n'en ait deux. Les jambes du singe sont comme celles de l'homme enfant quand il commence à faire des efforts pour s'en servir (cf. les chap. I à VI, VIII, IX et XVI du liv. III) [...] De même encore chez lui **l'articulation de la hanche** ressemble beaucoup à celle de l'homme, mais elle n'est pas exactement conforme comme l'est l'ensemble du bras. De plus, les **muscles charnus qui constituent les fesses** sont ridicules chez le singe, comme tout le reste, car nous avons montré que cet animal est une imitation risible de l'homme (III, XVI ; t. I, p. 277) [...] Les anatomistes qui nous ont précédé ont aussi voulu faire connaître ces muscles d'après le singe ; mais de même qu'ils avaient omis beaucoup de choses dans tout le corps, ils ont ici omis des muscles entiers. Nous avons nous-même écrit un traité spécial sur la dissection des muscles (cf. Chap. XXXIII, éd. Dietz). Nous avons également décrit dans le Manuel des dissections (II, IV, V, IX) quels sont le nombre et la forme des muscles de cette région, et nous indiquions en même temps les raisons qui avaient induit en erreur nos devanciers, à l'égard des muscles. [...] L'action des jambes, en vue de laquelle les muscles ont été créés, comprend la marche, la course et la station. **Dans la marche et la course, les jambes ont une position inverse l'une de l'autre ; dans la station leur position est la même.** En effet, dans la station les deux jambes s'appuient sur le sol qu'elles pressent également ; dans la marche et la course, l'une est appuyée, l'autre se porte en avant ; celle qui pose sur le sol fatiguant davantage. En effet, **celle qui se déplace ne fait que se mouvoir elle-même ; celle qui est appuyée, non seulement demeure tendue dans une position fixe, mais encore elle soutient le corps tout entier supportant un poids double de celui que toutes deux debout supportaient naguère.** Dans la translation, les muscles fléchisseurs de la jambe agissent davantage. Dans la station les muscles extenseurs demeurent fortement tendus, car s'ils pliaient tant soit peu, tout le corps de l'animal serait en danger de s'affaisser. La jambe est donc fléchie à l'aîne quand nous la levons, et si vous voulez maintenir le membre dans cette position, il faut que les muscles fléchisseurs soient tendus. La jambe est tendue quand nous la baissons vers le sol ; elle acquiert son maximum de tension quand nous sommes exactement debout. La nature a donc avec raison confié cette action à des muscles forts, nombreux et grands : d'abord à celui qui recouvre l'articulation tout entière à la partie postérieure (**grand fessier et tenseur du fascia lata**) et qui a son analogue dans le muscle de l'épaule (deltoïde) ; puis au muscle suivant qui dérive de toutes les parties externes de l'os iliaque, et qui s'insère au sommet du grand trochanter, avançant même un peu à la partie*

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

antérieure (moyen fessier) ; puis au troisième et suivant, lequel tient à la partie externe et inférieure de l'os iliaque, se fixe à la partie tout à fait interne du grand trochanter, et vient s'enrouler à la partie antérieure (petit fessier) ; puis enfin au quatrième et dernier, lequel procède de l'os large (sacrum), s'insère sur toutes les parties postérieures jusqu'au sommet du grand trochanter (analogue du pyramidal) »¹⁸⁶

L'œuvre de Galien représente une synthèse biologique des savoirs de l'Antiquité en reprenant les connaissances des acquis antérieurs principalement : la théorie des constituants fondamentaux du corps d'Empédocle, la théorie des quatre humeurs de l'école hippocratique, l'encyclopédisme aristotélicien, enfin les découvertes de l'école d'Alexandrie, tout un savoir qui sera enseigné dans toutes les universités du Moyen Age en même temps que la philosophie d'Aristote. Si Aristote fut un observateur, Galien y ajouta l'expérimentation difficile sur le vivant dont l'apport resta considérable, d'autant que la liberté d'esprit de l'Antiquité gréco-romaine sera obscurcie par le vent de sectarisme dogmatique qui caractérisa le millénaire suivant.¹⁸⁷

2) Le Moyen Âge

Cette période qui s'étale de la fin de l'Empire romain d'Occident en 476 apr. J.-C. provoquée par les invasions des peuples germaniques à la prise de Constantinople par les Turcs en 1453, est souvent considérée comme une période historique marquée de stagnations et d'obscurantismes sans progrès ni découverte. Culturellement entre deux ères fastes, l'Antiquité et la Renaissance, le Moyen Âge « réhabilite »¹⁸⁸ difficilement son histoire. L'Empire romain qui occupe la fin de l'Antiquité, laisse dans sa chute, des esprits corrompus par les querelles de pouvoirs, les frénésies populaires, le mépris de toute religion, de toute loi et pudeur.

La fermeture en 529 selon la réorganisation imposée du Corpus Juris Civilis (et sa seconde version en 534 le Codex reitae praelectionis) de l'école païenne néoplatonicienne d'Athènes par l'empereur orthodoxe, Justinien entraîne l'exode des principaux philosophes grecs. Cette école dirigée par Damascios dernier Diadogue¹⁸⁹, était la continuité de l'académie de Platon fermée en 86 av. J.-C. par le diplomate Sylla. Par cet acte, l'empereur, élu de Dieu, envisageait une nouvelle tentative pour reconstituer autour de la Méditerranée l'unité dans le vieil Empire romain dispersé par

¹⁸⁶ *ibid.*, p. 151-154.

¹⁸⁷ Buican D. *Histoire de la biologie. Hérité - Évolution*. Paris : Editions Nathan, 1994, p. 19.

¹⁸⁸ Le Goff J. « Il faut réintégrer le Moyen Age dans la suite constructive de notre histoire, il faut le réhabiliter. »

¹⁸⁹ Dernier représentant de la doctrine néoplatonicienne.

son immensité, étirée entre l'Occident et Orient. Unité confrontée aux torpeurs résurgentes du paganisme, mais aussi aux corruptions des hommes politiques impériaux.

Les philosophes s'expatrient pour se réfugier à Alexandrie ainsi que dans les grandes villes d'Harran et d'Antioche en Turquie, mais aussi à Bagdad. À cette émigration massive de la pensée grecque correspond une période faste de traductions en syriaque et en arabe qui propagent cette pensée. Les échanges sur les difficultés de traduction stimulent les commentaires et les éclaircissements qui dépassent la simple interprétation. Pendant la longue agonie de l'Empire romain et la période du Moyen-âge, les sciences naturelles subissent l'oubli comme dans de nombreuses autres disciplines. L'animal se trouve omniprésent dans la vie pratique de ses habitants et s'observe comme un instrument utile favorisant le labeur. Cette aide technique se célèbre aussi dans la culture transmise du symbolisme animalier des fêtes, des rites, des proverbes et des chansons. Par l'ensemble de ses implications, le monde animal concerne toutes les thématiques sociales.

1. Isidore de Séville

À la fin du VI^e siècle, les conditions de stabilité politiques et économiques dans certains pays et notamment l'Espagne wisigothique deviennent favorables au développement de centres culturels brillants, c'est le cas de Séville qui élève son statut d'inspiratrice intellectuelle pour les sciences et la philosophie par l'intermédiaire de l'œuvre considérable de son évêque Isidore (Isidorus Hispalensis).

Sous son impulsion et de l'action de Saint Léandre, la bibliothèque épiscopale de Séville devient une métropole culturelle et documentaire très importante. Les ouvrages capitaux, anciens et récents connus à l'époque s'assemblent de toutes les contrées, mais surtout des capitales Rome et Constantinople, matrices de la connaissance antique. Séville se constitue en un véritable conservatoire occidental de la culture à la fin du VI^e siècle, comme le sera Cordoue au X^e siècle avec une plus grande splendeur sous l'influence d'Al-Hakam II. Un nombre très important de dépisteurs, de collecteurs, de copistes, étendu à l'ensemble du monde islamique, achemine une collection considérable de plus de 400 000 ouvrages ou scribes et relieurs veillent à leur conservation.

La plupart des écrits historiques médiévaux espagnols puisent dans les œuvres d'Isidore de Séville. Notamment son étude principale et encyclopédique *Traité des Étymologies ou des Origines* (Etymologiae) vingt livres édités des dizaines de fois, et cela jusqu'au XVI^e siècle, rassemblant le savoir classique expliqué par le biais de

définitions et d'exemples où la logique phonétique domine. C'est le plus grand ouvrage de l'évêque de Séville, terminé par son disciple Braulio de Saragosse. Cette compilation se révèle d'une importance capitale pour l'histoire des sciences, car elle rassemble le bilan des sciences étudiées jusqu'au début du VII^e siècle. Isidore utilise pour cela des extraits d'ouvrages anciens, certains aujourd'hui perdus, pour définir les termes expliqués, mais aussi situer le point d'achoppement des sciences de l'époque.

Le livre XII des *Étymologies* consacré aux animaux présente pour principale vertu un classement simple des catégories animales en huit groupes (1. Le bétail et les bêtes de somme, en fait les quadrupèdes utiles à l'homme ; 2. Les quadrupèdes sauvages ; 3. Les petits animaux selon un groupement disparate : mulot, belette, musaraigne, taupe, loir, hérisson, le grillon, la fourmi et le fourmilion ; 4. Les serpents ; 5. Les vers ; 6. Les poissons ; 7. Les oiseaux ; 8. Les petits animaux ailés). Comme le souligne Jacques André,¹⁹⁰ « Une étude ainsi présentée souffre sans doute de la comparaison avec Aristote, où les animaux sont envisagés sous l'angle rationnel de leurs particularités physiologiques, organe par organe, fonction par fonction, en différents chapitres. Cette méthode est absolument étrangère à Isidore, qui propose une simple énumération comportant certains groupements, suivant en cela le système plinien qui distinguait quatre classes : quadrupèdes domestiques et sauvages (1.8), animaux aquatiques (1.9), oiseaux (1.10) et insectes (1.11) et versait dans ce cadre large les données autrement réparties que lui fournissait Aristote. » L'étude du mouvement des animaux n'intéresse pas l'auteur. Il dépeint en quelques mots les caractéristiques spécifiques des animaux concernés. Les portraits souvent justes laissent imaginer aussi les traits de caractères et de moralités dans la tradition fabuliste. Bref et concis, le style est très explicite « On dit en latin *animalia* (animaux) ou *animantia* (êtres animés), parce que la vie les anime (*animantur*) et que le souffle vital leur donne le mouvement ».¹⁹¹ L'importante documentation qu'Isidore réunit dans ses sources l'aide à clarifier dans ses descriptions les définitions des animaux pour cela il se réfère à Lucain, Pline l'Ancien, Cicéron, Ovide, Afranius, Virgile... Mais aussi l'ancien et le Nouveau Testament. Malgré le respect que l'on témoigne toujours pour les auteurs anciens comme Hippocrate et Galien progressivement l'expérience personnelle se révèle aussi utile et nécessaire que cette connaissance des textes. En effet à la culture et l'instruction qui représentent déjà des moyens d'ascension sociale s'ajoute une démarche interprétative et critique qui propose

¹⁹⁰ Isidore de Séville. *Étymologies. Livre 12 : Des animaux*. Texte établi, traduit et commenté par Jacques André. Paris : Les Belles Lettres, 1986.

¹⁹¹ *ibid.*, p. 38.

de nouvelles avancées médicales ou chirurgicales s'ajoutant à l'édifice du savoir établi par les ancêtres. Autour d'études individuelles se rassemblent de simples communautés intellectuelles maîtres - élèves qui se constituent dans certaines villes en institutions où l'on enseigne « l'universalité » des connaissances et du savoir dans la plupart des domaines de l'étude philosophique.

La ville de Bologne en 1088 lance par la création de la première université du monde occidental un foisonnement de ce type de structures d'enseignement pédagogiques et surtout théologiques dans les autres grandes villes du XI^e siècle. En effet, l'étude de la physique par la réflexion sur la pensée comme sur la nature participe à la fondation des premières universités en quelques années dans les grandes villes d'Italie (Salerne, Bologne, Padoue, Naples, Rome, Pavie) puis de France (Paris, Montpellier), d'Espagne (Valence, Salamanque) et d'Angleterre (Cambridge). Leurs développements et les échanges entretenus préparent l'Europe intellectuelle sous la vigilance malgré tout de l'orthodoxie de l'église qui contrôle le recrutement des enseignants et les cours dispensés. Mais les critiques se perpétuent sur la conciliation entre les constatations de l'étude de la nature et la vérité attestée par l'enseignement de l'église.

L'Antiquité tardive et la période médiévale, durant, lesquelles a prévalu la conception dualiste de l'âme et du corps véhiculée par le christianisme, n'apportent, de notre point de vue, aucun développement essentiel sur les hypothèses de la locomotion et celles qui sont spécifiques à la marche. Sous prétexte d'une absence d'adéquation avec la tradition biblique de la Genèse, l'Église menace en 1210 d'excommunication ceux qui propagent les idées d'Aristote, jugées trop matérialistes. Mais finalement, cette mesure attisa la curiosité et l'intérêt des érudits, Robert Grosseteste et Roger Bacon, mais aussi les dominicains Albert le Grand et Thomas d'Aquin qui spéculeront en commentant sur les théories aristotéliennes des lois de la nature.

2. Albert le Grand

Reprenant les tendances de son siècle, Albert le Grand dans son grand traité *De Animalibus*, paraphrase depuis les traductions d'Avicenne et d'Averroès les trois traités d'Aristote l'*Histoire des animaux*, le traité des *Parties des animaux* et celui de la *Génération des animaux* qu'il réunit en un seul. Ainsi son traité *Des Animaux* est composé de dix-neuf livres rapportant en paraphrases libres les travaux antiques zoologiques d'Aristote et de sept livres qui sont les fruits de ses observations et de ses

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

enquêtes auprès de chasseurs, fauconniers, baleiniers... Voici comme il explicite l'organisation de son œuvre : « *Nous diviserons la science des diverses classes d'animaux d'après un double point de vue. Il s'agit d'examiner d'abord leur différence de conformation, d'activité et d'origine, puis en faire connaître les causes propres et naturelles. Nous traiterons donc dans les dix premiers livres des différences, des conformations, de l'anatomie, des actes et de la génération des animaux, pour expliquer ensuite, dans les neuf suivants, la vie et les causes physiques de tous ces phénomènes.* »¹⁹² Albert le Grand rédige en s'autorisant de critiquer Aristote selon un travail de pure philosophie naturelle, sans aucune référence aux enseignements de la religion chrétienne, en y incluant l'espèce humaine. Ses recherches compilent les informations de tous les anciens auteurs, les écrits des Grecs, des Romains, des Arabes et des savants occidentaux du Moyen âge, pour compléter les traités d'Aristote. Les êtres humains sont, pour lui, « *les animaux les plus parfaits* », puisqu'ils sont seuls à posséder une âme rationnelle. Sa conception du mouvement locomoteur suit la logique des puissances motrices de l'âme propre à Aristote, mais en la complétant des avancées sur la compréhension du fonctionnement anatomique : « *Le cœur n'est point cause du mouvement, comme le démontre l'anatomie, mais il s'exécute par les muscles. Nous voyons naître dans chaque muscle mobile un nerf qui communique avec le membre mis en mouvement* ».¹⁹³ Les animaux sont l'une des composantes d'un continuum hiérarchique de créatures vivantes, qui s'étend des plantes, à travers les zoophytes, aux animaux supérieurs, puis aux humains et, au-dessus d'eux, aux anges. L'homme est un être à part des animaux ; seul, il réunit en lui le monde de la matière et le monde de l'esprit ; seul, il représente le lien entre cet univers et Dieu. D'ailleurs Albert le Grand essaye de montrer comment chez l'homme le sens central où la sensibilité se trouve plus développée et les autres sens plus élevés que chez les animaux. C'est l'homme qui possède la forme corporelle la plus parfaite, il se déplace avec la tête levée selon l'agrément de l'âme, principe du mouvement. Mais seul Dieu comme premier moteur accorde ce droit.

La connaissance du corps par la dissection deviendra l'obsession des médecins de la fin du Moyen Âge qui fondaient jusque-là leur science sur les lectures et l'apprentissage d'une anatomie et d'une « *physiologie* » galénique et hippocratique. Cette « *renaissance* » tardive de l'anatomie relève de causes multiples, essentiellement d'ordre morales : les interdits religieux, généralement sous-tendus par le respect de

¹⁹² Sighart J. *Albert Le Grand : sa vie et sa science d'après les documents originaux*. Traduit de l'allemand par un religieux. Paris : librairie de Mme Ve Poussielgue-Rusand, 1862, p. 552.

¹⁹³ De animâ, p. 179. In Albert Le Grand : sa vie...p. 532.

l'intégrité du corps, le sort de l'âme après la mort, en fait l'idée de résurrection, mais aussi l'impureté engendrée par le contact avec les morts. C'est en effet toute l'Antiquité tardive, chrétienne ou non, qui est imprégnée de la pensée que la proximité des morts est porteuse d'impureté, que leur contact risque de souiller les vivants. Le dogme incontesté de l'anatomie galénique, décrit au II^e siècle à partir des dissections animales, la prohibition forte et pesante du clergé ainsi qu'une certaine éclipse chirurgicale pendant le Moyen Âge semble s'estomper.

Depuis le XIII^e siècle, Albert le Grand avec ses travaux influença sans partage pendant plusieurs siècles les autres savants et les sciences restèrent ce qu'il les avait fait. Ses critiques ponctuelles des travaux d'Aristote se rassemblent en la rédaction d'une encyclopédie ambitieuse, terminée en 1270, l'œuvre accumule en vingt-six livres l'interprétation des traités d'Aristote, mais aussi des études spécifiques selon la classification du naturaliste romain Pline l'ancien (23-79) destinées à une meilleure compréhension du déplacement des animaux qui marchent, volent, nagent et rampent.

3) La Renaissance

Dès le début du XV^e siècle, le nouvel esprit scientifique, critique et empirique, s'était opposé à la tradition dogmatique des Écoles. L'autorité d'Aristote en biologie, celle de Galien en anatomie sont sérieusement remises en question. En France, la première démonstration publique de dissection est faite à Montpellier en 1377. La dissection devient matière officielle d'enseignement pour la médecine dès 1405, à Bologne. Une encyclique de Sixtus IV permet, en 1475, la dissection du corps humain que l'Église en fait, n'avait jamais explicitement interdite. À partir du XIV^e siècle, l'accroissement fondamental de la philosophie naturelle s'opéra précisément dans l'anatomie, par suite d'une série de dissections humaines que les préjugés religieux avaient entravée jusqu'alors. Les connaissances anatomiques en Europe se développent pendant cette période, avec une plus grande acceptation de la dissection humaine dans la mesure où de nombreuses démonstrations s'effectuent en public. La période de la Renaissance, principalement avec le XVI^e siècle renoue son attachement aux études artistiques et scientifiques du corps humain et animal. Les savants redécouvrent par l'interprétation et la traduction des auteurs naturalistes antiques, la pratique de la dissection, les problématiques anatomiques, mais aussi physiologiques.

La Renaissance engendrera un changement important dans la manière de considérer l'homme. La redécouverte de l'héritage de l'Antiquité gréco-romaine

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

implique une perception du corps renouvelée, la liberté d'entreprendre et de représenter la voie de l'expérimentation dans les sciences et les arts. Savants et artistes explorent, avec un souci plus grand de vérité et de réalisme, l'anatomie associée à son fonctionnement physiologique. Cette dernière constitue « *Le prolongement scientifique du sentiment d'attachement et de curiosité que les êtres humains éprouvent à l'égard de toutes les manifestations de la vie. Il s'agit d'une science faite pour les audacieux* »¹⁹⁴. Peut-on parler d'un phénomène spécifiquement italien à cette époque, non ; seulement de prépondérance, celle de la passion de connaître le fonctionnement du corps humain, commune aux artistes et aux anatomistes ? Cette période fut bien antérieure aux travaux d'anatomie fonctionnelle de Borelli, on pense aux premiers traités d'anatomie dans lesquels les illustrations anatomiques commencent à jouer un rôle essentiel en la personne de Jacopo Berengario da Carpi considéré comme tel par Gabriel Fallope, aux nombreux dessins de Léonard de Vinci, enfin aux fresques de Michel-Ange qui s'était livré à des études assidues du corps humain pour dévoiler la configuration extérieure des muscles, de leurs rapports et fonctions avec l'ossature, aux planches de la *Fabrica* d'André Vésale et leurs influences sur la pédagogie de l'enseignement de l'anatomie dans les Universités de Padoue, de Bologne et de Pise.

Les débuts de la Renaissance italienne sont marqués par des événements internationaux et des facteurs politiques qui, s'ils ne créent pas ce nouveau style, le favorisent et permettent son développement rapide. Une des composantes de cette Renaissance est certainement le réveil du goût pour l'Antiquité classique, ainsi qu'une imitation volontaire de l'art gréco-romain. En dehors de ce renouveau d'intérêt pour l'Antiquité parmi les artistes et les écrivains de la Renaissance, on constate également une intensification de l'étude de la nature. C'est une période d'expérimentations et d'explorations, d'intenses agitations dans l'univers artistique et intellectuel qui a pu être décrit comme « *l'âge de la découverte du monde et de l'homme* ». On assiste réellement à un engagement profond dans l'examen de la nature, dont l'homme est conçu comme le centre. Le goût pour le naturalisme est prononcé dans les représentations picturales et sculpturales de la nature.

¹⁹⁴ Campbell N. A., Reece J. B., Mathieu R. Biologie. Bruxelles : De Boeck Université, 2006, p. 1.

1. Léonard de Vinci

Léonard s'est intéressé à la connaissance des phénomènes naturels par l'intermédiaire des méthodes expérimentales et mathématiques dans la perspective de connaître la vérité du fonctionnement des processus vivants observés principalement pour des applications pratiques dans l'art ou dans la vie de tous les jours. Finalement, il eut très peu d'influence sur l'évolution de la science de son temps, son art principalement a pérennisé son nom. Leonardo di Ser Piero da Vinci, dit Léonard de Vinci¹⁹⁵, s'est affirmé dans la longue durée historique comme un créateur aux multiples facettes. Il sera tour à tour sculpteur, décorateur, organisateur de bals masqués, de tournois, inventant aussi "d'ingénieux dispositifs automatiques" pour les divertissements (on pense au déplacement du lion automate conçu pour distraire le Roi de France François I^{er} déambulant avec la poitrine entre ouverte pour révéler des fleurs de lys et qui reprend vie au XXI^e siècle, par le spécialiste des automates artisan d'art Renato Boaretto), mais encore ingénieur, urbaniste, industriel, auteur d'un traité de la peinture et d'autres essais, illustrant d'innombrables dessins, sur la botanique, la géologie, l'anatomie (il disséqua plus de trente cadavres), l'hydraulique, et enfin peintre.

Il effectuera de nombreuses études artistiques sur les proportions du corps humain, l'anatomie et la physionomie. Ses représentations remettront en question et à juste titre, les études anthropométriques basées sur les proportions idéales et antiques de Vitruve (vers 50 av. J.-C.). Le court extrait qui suit montre toutefois les avancées de Vitruve dans les relations de proportionnalités des différentes parties du corps humain et ses possibles relations avec l'art architectural. Proportions anthropométriques des segments anatomiques précisées mais toujours utilisées pour calculer lors des mouvements, les fluctuations du centre de gravité des hommes ou des animaux et déduire ainsi le travail réalisé, mais aussi les dépenses énergétiques.

« 1. L'ordonnance d'un édifice consiste dans la proportion, chose à laquelle l'architecte doit apporter le plus grand soin. Or, la proportion naît du rapport de grandeur que les Grecs appellent ἀναλογία. Ce rapport est la convenance de mesure qui existe entre une certaine partie des membres d'un ouvrage et le tout ; c'est d'après cette partie qu'on règle les proportions. Car il n'est point d'édifice qui, sans proportion ni rapport, puisse être bien ordonné ; il doit avoir la plus grande analogie avec un corps humain bien formé.

2. Or, voici les proportions que lui a données la nature : le visage depuis le menton jusqu'au haut du front, à la racine des cheveux, est la dixième partie de la hauteur de l'homme ; la paume de la main, depuis l'articulation du poignet jusqu'au bout du doigt du milieu, a la même longueur ; la tête, depuis le menton jusqu'au

¹⁹⁵ Viatte F., Forcione V. *Léonard de Vinci : dessins et manuscrits*. [Exposition] Paris : Musée du Louvre, 5 mai - 14 juillet 2003. Paris : Réunion des Musées Nationaux. Koering, 1. (2003). Léonard de Vinci. Paris Hazan ; Paris : Musée du Louvre. Temperini, R. (2002). L'ADCdaire de Léonard de Vinci. Paris : Flammarion.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

sommet, forme la huitième partie; même mesure par-derrière ; depuis le haut de la poitrine jusqu'à la racine des cheveux, il y a une sixième partie, et jusqu'au sommet de la tête une quatrième. La longueur du visage se divise en trois parties la première s'étend depuis le bas du menton jusqu'au-dessous du nez ; la seconde, depuis le dessous du nez jusqu'au haut des sourcils, et la troisième, depuis cette ligne jusqu'à la racine des cheveux, qui termine le front. Le pied a la sixième partie de la hauteur du corps ; le coude, la quatrième, de même que la poitrine. Les autres membres ont aussi leurs mesures et leurs proportions ; c'est en les observant que les plus célèbres peintres et sculpteurs de l'antiquité ont acquis une réputation si grande et si durable.

3. *Il en est de même des parties d'un édifice sacré : toutes doivent avoir dans leur étendue particulière des proportions qui soient en harmonie avec la grandeur générale du temple. Le centre du corps est naturellement au nombril. Qu'un homme, en effet, soit couché sur le dos, les mains et les pieds étendus, si l'une des branches d'un compas est appuyée sur le nombril, l'autre, en décrivant une ligne circulaire, touchera les doigts des pieds et des mains. Et de même qu'un cercle peut être figuré avec le corps ainsi étendu, de même on peut y trouver un carré : car si on prend la mesure qui se trouve entre l'extrémité des pieds et le sommet de la tête, et qu'on la rapporte à celle des bras ouverts, on verra que la largeur répond à la hauteur, comme dans un carré fait à l'équerre. »¹⁹⁶*

Grâce à ses séries de mesures, de Vinci réussit à vaincre le canon antique tout en illustrant les données vitruviennes, créant un dessin qui fait encore autorité aujourd'hui. Il se trouve que seul le centre de l' « *homo ad circulum* » est dans le nombril celui de « *l'homo ad quadratum* » se trouve au-dessus du pubis.

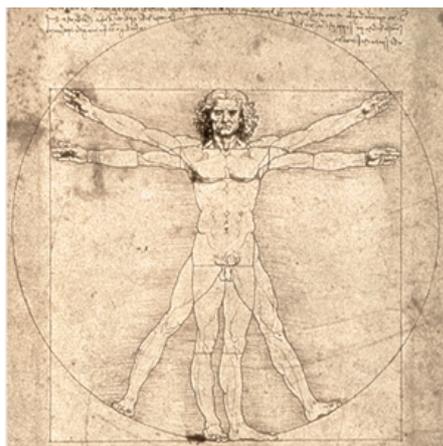


Figure 13. L'Homme de Vitruve de Léonard de Vinci. [34,3 x 24,5] Venise, Galleria dell'Accademia, 1490.

Cependant, ces dessins étaient si en avance sur leur époque, qu'ils ne pouvaient être utilisés directement dans le quotidien médical. Dans ses dessins anatomiques, il se concentre de plus en plus sur les muscles et les mouvements, et les dessins qu'il réalise témoignent de manière saisissante de ses talents incomparables d'observateur et de dessinateur. Les études de Léonard n'en resteront pas moins, sur la durée des dessins anatomiques précis et exacts, admirés par les rares personnes qui purent les voir.

¹⁹⁶ Vitruve. *De l'architecture*. Traduction nouvelle de M. Ch.-L. Mauftras. [Livre III. Tome premier. D'après quel modèle on a établi les proportions des temples]. Paris : C. L. F. Panckoucke, 1847, p. 241-245.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

Cependant ses contributions anatomiques exemplaires sur les détails ne furent vraiment reconnues qu'au XX^e siècle. Afin de ne pas affronter les tribunaux ou les procédures inquisitoriales, il ne cherche jamais à rendre publiques ses découvertes. C'est pour cela que ses notes écrites de droite à gauche, en miroir, rendaient son écriture illisible et ses notes indéchiffrables pour le profane.

Il entrevit les lois de la mécanique appliquée à l'anatomie descriptive et fonctionnelle en percevant les différents rapports anatomiques entre les structures du corps de façon statique ou dynamique. Comme Aristote, de Vinci a impressionné ses contemporains, mais surtout avec une durée de latence importante les générations suivantes avec une approche méthodique des savoirs : apprendre, observer et analyser. La démarche qu'il déploya dans l'ensemble des activités qu'il abordait, aussi bien en art qu'en technique (les deux ne se distinguant d'ailleurs pas dans son esprit), procédait d'une accumulation préalable d'observations détaillées, de savoirs disséminés çà et là, qui tendait vers un surpassement de ce qui existait déjà, avec la perfection pour objectif. Bon nombre des croquis, notes et traités de Léonard de Vinci ne sont pas à proprement parler des trouvailles originales, mais sont le résultat de recherches effectuées dans un souci encyclopédique du moindre détail. Le recours insistant aux procédés mathématiques était une garantie de rationalité et l'unique moyen de s'assurer des principes stables dans les deux domaines de prédilection où Léonard entendait se « réaliser », la peinture et la mécanique. En mécanique, précisément, il s'illustra en inventant un certain nombre de machines : moulins, pompes, scies, marteaux mécaniques, appareils de transmission, horloges, sont analysés et remontés avec le détail de leurs organes dans d'admirables dessins.

Les manuscrits de Léonard contiennent en germe les fondements de la science expérimentale appuyés sur les travaux de certains de ses prédécesseurs notamment Albert de Saxe dont les principes ne seront formulés qu'un siècle plus tard par Galilée et Bacon. Les idées principales qui nous intéressent sur ce point de vue visent à relever l'importance de l'expérience ou à faire sentir que, sans l'application des mathématiques, les résultats de notre connaissance ne peuvent acquérir une certitude pleine et entière. Mais il ne veut pas s'arrêter à la simple perception. Il est convaincu qu'à chaque élément actif « *potentia* » de la nature sont liés des effets d'une qualité déterminée qui se développent dans un ordre spécifique, en ce sens il ne s'éloigne pas d'Aristote, « *L'un de ses principes est que la nature ne fait rien en vain, mais réalise toujours le meilleur parmi les possibles* ».

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

*qui correspondent à l'essence de chaque animal. Aussi quand une chose est meilleure de cette façon, elle l'est aussi conformément à la nature »*¹⁹⁷.

La connaissance mathématique avec ses moyens peut s'appliquer à l'expérience en permettant de conclure sur les hypothèses des causes des phénomènes. Vinci le montre avec le plus d'évidence et de simplicité dans ses applications mécaniques, qui feront de lui un adepte de la science de l'ingénieur.¹⁹⁸ Il soulignera l'importance de la mécanique dans l'étude des êtres vivants en écrivant que : « *La mécanique est la science la plus noble et plus encore, la plus utile, car elle permet de comprendre les mouvements de tous les êtres animés.* »¹⁹⁹ Cependant, les secrets mathématiques de ses connaissances sur le mouvement anatomique des corps, connus seulement sous des formes imparfaites et inachevées que Léonard pouvait glaner des écritures des auteurs antiques et médiévaux, mais aussi de ses expériences, ne devaient être découverts qu'un siècle plus tard.

Aujourd'hui, des disciplines comme l'ostéopathie et la kinésithérapie se définissent comme des médecines manuelles et mécanistes. On leur reconnaît, une véritable « *science anatomique appliquée à la mécanique corporelle* », très proche de la conception du mouvement iatomécanique. Si la compréhension anatomo-fonctionnelle puis biomécanique ne peut tout expliquer, elle est une base indispensable. Cet artiste, ingénieur et scientifique, était particulièrement intéressé par la compréhension et la représentation du corps humain dans le mouvement, où « *Le mouvement est principe de toute vie* »²⁰⁰. De Vinci interprète l'étude du mouvement et l'équilibre par l'intermédiaire de notions et de concepts mécaniques comme les leviers, le centre de masse, le centre de gravité. Les exemples ne manquent pas, on relève dans Les carnets de Léonard de Vinci, dans le chapitre XVII, du Tome I consacré à l'analyse du vol que « *Dans une machine volante, l'homme (doit) rester libre depuis la taille jusqu'en haut, pour pouvoir conserver l'équilibre, comme il fait en barque, de telle sorte que son centre de gravité et celui de son appareil puissent s'équilibrer et se déplacer au besoin, par un changement du centre de sa résistance.* »²⁰¹. On pourrait utiliser la citation suivante « *Quand l'oiseau reste stationnaire, dans l'air, sans l'aide du vent, sans battement d'ailes, dans une position d'équilibre, c'est preuve que son centre de gravité coïncide avec celui de sa masse* »²⁰² pour démontrer que dans la gestion de l'équilibre aussi bien en

¹⁹⁷ MA. Chap. II. Paragraphe 2, p. 13.

¹⁹⁸ Höffding H. *Histoire de la philosophie moderne*. [Tome I], Paris : éditeur Félix Alcan, 1906.

¹⁹⁹ De Vinci L. *Les carnets de Léonard de Vinci*. Introduction, classement et notes par Edward Mac Curdy ; traduit de l'anglais et de l'italien par Louise Servicen ; préface de Paul Valéry, Librairie Paris : Gallimard, 1942.

²⁰⁰ *ibid.*, p. 39.

²⁰¹ *ibid.*, p. 330.

²⁰² *ibid.*, p. 341.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

position statique de posture debout que de marche, les fluctuations mécaniques de ces deux paramètres centre de masse et centre de gravité sont toujours d'actualité pour comprendre l'équilibre ou le mouvement.

Nous le suivons dans ses analyses anatomiques « *Les muscles de la poitrine et du rachis font tourner l'axe de l'humérus des oiseaux et c'est là que prend naissance la faculté d'abaisser ou d'élever la queue au gré ou selon les besoins de l'animal qui se meut.* »²⁰³ comme initiatique à l'anatomie fonctionnelle et à la compréhension du mouvement. Les chapitres III, IV et VII sont d'autant plus significatifs, car faisant spécifiquement référence à l'anatomie, l'anatomie comparée et aux proportions l'homme.

Son approche par la mécanique est aussi riche d'enseignements pour comprendre la locomotion « *lorsque l'oiseau s'abaisse, son centre de gravité est hors du centre de sa résistance. Et si l'oiseau veut s'élever, son centre de gravité reste en arrière du centre de résistance.* »²⁰⁴. Le chapitre XIX, consacré au mouvement et à la pesanteur est révélateur des potentialités d'interprétations et d'analyses de la locomotion du savant quand on apprécie à juste titre l'étendue de ses connaissances mécaniques et leurs applications pour l'époque. Pour De Vinci qui considère que « *La mécanique est le paradis des sciences mathématiques, car grâce à elle on recueille leurs fruits* »²⁰⁵ ses facultés de compréhension du mouvement sont considérables compte tenu de sa maîtrise de l'anatomie et de sa représentation. Il avait l'habitude d'utiliser des lettres pour identifier les muscles et les nerfs dans le corps humain, afin de mieux décrire les mécanismes des positions et des mouvements : équilibre du corps, marche vers le haut et en descente, se lever d'une position de repos, sauter. Pour démontrer l'action et l'interaction progressives de divers muscles pendant le mouvement, il proposait que des cordes soient fixées à un squelette aux points d'origine et d'insertion des muscles. Comme le souligne Pierre-Marie Gault De Saint-Germain « *Le Traité de la Peinture peut encore le placer au rang des physiciens du premier ordre ; car il établit les lois de l'équilibre et du mouvement, et démontre l'influence du centre de gravité sur les corps, en homme qui mesure la force et la durée, il sait encore faire connaître les éléments de la matière, et en expliquer l'essence en philosophe qui approfondit et remonte aux causes.* »²⁰⁶ Dans le court extrait ci-dessous Vinci applique ses connaissances de mécaniciens pour justifier

²⁰³ *ibid.*, p. 340.

²⁰⁴ *ibid.*, p. 341.

²⁰⁵ *ibid.*, p. 511.

²⁰⁶ De Vinci L. *Traité de la peinture : précédé de la vie de l'auteur et du catalogue de ses ouvrages, avec des notes et observations de Pierre Marie Gault de Saint-Germain.* Genève : chez Sestié fils, Nouvelle édition, 1820, pp. ii-iii.

et perfectionner l'harmonie de ses croquis puis de ses dessins dans sa peinture. Comme pour indiquer la voie aux futurs peintres, il propose de faire « en sorte que le livre des éléments de mécanique, avec les exemples qu'il contient, précède la démonstration du mouvement et de la force de l'homme et des autres animaux, et ainsi tu pourras fournir la preuve de toutes tes propositions »²⁰⁷.

Dans les éléments de mécanique, il donnera une part prépondérante à l'équilibre par l'application rigoureuse du principe du levier qui permet de confirmer l'impossibilité de créer la force de rien et d'échapper à la nécessité d'associer les effets aux causes. Il explique très simplement comment créer d'autant plus de vitesse dans le déplacement par le décalage entre les points d'appui et la projection verticale du centre de masse du corps de l'animal ou de l'homme.

« Chapitre CCII. [p. 222] De l'homme qui marche. (Pl. 11) L'Homme qui marche aura **le centre de sa pesanteur A sur le centre de la jambe B qui pose à terre.**

Chapitre CCVII. [p. 225] Du mouvement de l'homme. Quand vous voulez faire qu'un homme remue quelque fardeau, considérez que les mouvements doivent être faits par diverses lignes, c'est-à-dire, ou de bas en haut, avec un mouvement simple, tel que fait celui qui, s'étant baissé, prend un fardeau qu'il veut hausser en se relevant, ou bien, quand il veut traîner quelque chose derrière lui, ou le pousser en devant, ou bien pour tirer en bas avec une corde qui soit passée dans une poulie. Il faut remarquer que **le poids du corps de l'homme tire d'autant plus, que le centre de sa pesanteur est éloigné du centre de l'axe qui le soutient** : il faut encore ajouter à cela l'effort que font les jambes et les reins courbés pour se redresser. Jamais on ne marche, soit en montant, soit en descendant, que le talon du pied de derrière ne se hausse.

Chapitre CCXLIX. [p. 267] Du mouvement des animaux. Tout animal à deux pieds, dans son mouvement, baisse plus la partie qui est sur le pied qu'il lève, que celle qui est sur le pied qu'il pose à terre, et sa partie la plus haute fait le contraire ; ce qui se remarque aux hanches et aux épaules de l'homme pendant qu'il marche : et la même chose arrive aux oiseaux dans leur tête et leur croupion.

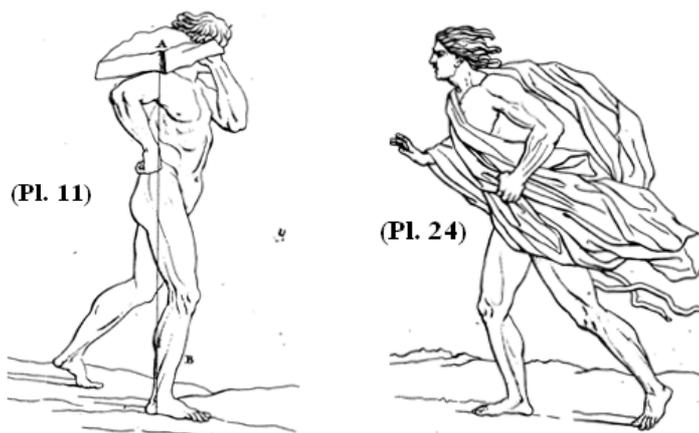
Chapitre CCXCV. [p. 298] Des figures qui marchent contre le vent. (Pl. 24) Un homme qui marche contre le vent, quand il est violent, ne garde pas **la ligne qui passe par le centre de sa pesanteur avec l'équilibre parfait qui se fait par la distribution égale du poids du corps autour du pied qui le soutient.**

Chapitre CXCIX. [p. 220] De l'homme et des autres animaux, lesquels dans leurs mouvements lents n'ont pas le centre de gravité beaucoup éloigné du centre de leur soutien. **Tout animal aura le centre des jambes sur lesquelles il se soutient, d'autant plus proche de la perpendiculaire du centre de sa gravité, qu'il sera plus lent dans son mouvement ; et, au contraire plus éloigné de la perpendiculaire du centre de sa gravité, qui sera plus prompt dans ses mouvements.**

Chapitre CCVIII. [p. 226] Du mouvement qui est produit par la perte de l'équilibre. Tout mouvement est produit par la perte de l'équilibre, c'est-à-dire, de l'égalité, parce qu'il n'y a aucune chose qui se meuve d'elle-même, sans qu'elle sorte de son équilibre, et **le mouvement est d'autant plus prompt et plus violent, que la chose s'éloigne davantage de son équilibre.** »²⁰⁸

²⁰⁷ De Vinci L. *Les carnets de Léonard de Vinci. Introduction, classement et notes par Edward Mac Curdy ; traduit de l'anglais et de l'italien par Louise Servicen ; préface de Paul Valéry.* [Mouvements et forces animales soumis aux lois mécaniques] Librairie Paris : Gallimard, 1942, p. 63.

²⁰⁸ *ibid.*, Gault De Saint-Germain.



Les recherches historiques d'un auteur comme Duhem montrent que le progrès des théories se fait plutôt par retouches continues que par bouleversements. Selon lui, aucune hypothèse nouvelle n'apparaît brusquement, et même les remplacements surviennent de façon continue. Il s'appuie sur l'histoire de la physique pour nous faire comprendre la progression des théories. Une approche par la biomécanique serait à notre avis plus riche d'enseignements sur la logique de la construction des modèles d'interprétation. Dans ses *Études sur Léonard de Vinci* (1906-1913), il montre comment le renouvellement des sciences commence non pas à la Renaissance, mais dès le XIII^e siècle. Il relève combien Copernic, Galilée et les savants du XVII^e siècle ont été tributaires des œuvres de nombreux prédécesseurs, négligés jusqu'alors et dont il réévalue l'importance, percevant dans la consultation des carnets manuscrits de Léonard de Vinci, des citations et des références à des auteurs antérieurs. D'autres travaux historiques de Duhem, sur *L'Évolution de la mécanique* (1903), sur *Les Origines de la statique* (1905-1906) révèlent cette tendance. Ce qui se confirme vrai pour les avancées physico-mathématiques se vérifie pour l'anatomie fonctionnelle et physiologique, notamment avec l'œuvre de *La Medicina* de Jean Fernel.

2. Jean Fernel

En effet avec *La Medicina* parut à Paris chez Wechel en 1554, sous la forme d'un volume comportant trois parties : *Physiologia*, *Pathologia*, *Therapeutice seu medendi ratio*, les conceptions anatomiques et physiologiques subissent des transformations, d'un esprit plus proche de la Renaissance que de la scolastique. Dans la préface de la *Physiologia*, l'auteur distingue l'anatomie de la physiologie comme la géographie à l'histoire : elle décrit le théâtre des événements, ce que l'on voit et sent, tandis que la physiologie permet d'accéder à la connaissance par la méditation. Cet ouvrage qui recueille l'enseignement de Galien fut souvent réédité et considéré comme le manuel

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

d'enseignement agrée de médecine jusqu'au XVII^e siècle. Dans les trois éléments qu'il présente pour distinguer l'homme de l'animal, aussi bien dans sa structure anatomique comme son mouvement physiologique, ces éléments distinctifs sont toujours d'actualité chez le paléontologue, l'archéologue ou l'anthropologiste. Pour Fernel, l'âme constitue la source de vie et cause première des manifestations vitales et organiques. Pour chaque faculté de l'âme correspond une fonction, dans cette logique organisationnelle du mouvement et de la locomotion, l'une étant la cause, l'autre l'effet, tout comme les conceptions d'Aristote et de Galien. Pour l'âme sensitive, dont il y a trois facultés principales correspondant aux actions essentielles de la vie animale : la perception du monde extérieur, la locomotion et la sensation proprement dite détiennent leurs sources non pas dans le cœur comme le laissait supposer Aristote, mais dans le cerveau à l'image de Galien. Dans ce contexte, le déplacement corporel devient le signe d'un mouvement des esprits, qui lui-même, suit et exprime les consignes de l'âme. Toute une théorie cette fois anatomo-physiologique de la locomotion est explicitée dans le détail du fonctionnement des organes et des appareils. Toutes les petites parties du corps de l'homme ou de l'animal semblent jouer un rôle finalement déterminant dans le mouvement depuis les os, les articulations, les muscles, les nerfs, les tendons, les ligaments, jusqu'à certaines parties très difficiles à explorer pour cette période.

Pratiquement jusque vers le XVII^e siècle, l'anatomie n'est pas considérée comme une science fondamentale ; en un mot, il ne sert à rien de connaître l'anatomie pour l'anatomie. Ainsi, comprendre par soi-même et par la dissection révolutionnera l'anatomie à la Renaissance et sera l'occasion de luttes acharnées, de joutes verbales et livresques entre pro galénistes, ne remettant pas en cause la toute puissante anatomie animale, et les anti galénistes, qui introduisent dans une ère nouvelle des notions recueillies par l'étude approfondie des entrailles du cadavre. Ainsi Vésale voulut faire renaître la tradition galénique, Matteo Realdo Colombo redécouvrit les travaux de l'École d'Alexandrie et Fabrice d'Acquapendente s'inscrit délibérément dans la tradition aristotélicienne. Parallèlement, une corporation qui ne présente aucun lien direct avec la médecine, la guilde des peintres florentins, se prend de passion pour le corps humain, dans le but de le sublimer au travers de leurs créations, de révéler une certaine vérité sur l'homme en perpétuant son image de manière la plus fidèle possible, de substituer avec leurs mains d'artiste la pureté d'un nu à cette vision intolérable du cadavre étalé sur une table dont ils se servent pour parfaire leur connaissance de la myologie.

3. André Vésale

Au XVI^e siècle, le chirurgien le plus connu de son temps est probablement l'anatomiste flamand Andreis van Wesel, dit Vésale, médecin de Charles Quint, bien qu'il n'ait pas été le seul anatomiste du moment à effectuer des dissections publiques. Sa démarche lui fait relever plus de 300 erreurs dans les descriptions anatomiques de Galien : mauvaises insertions des muscles, trajets différents des vaisseaux et des nerfs... qui l'incitent à penser que le travail de son illustre prédécesseur s'est basé sur des dissections d'animaux et particulièrement du singe. Il édite son opus *De Humani Corporis Fabrica de magnum* dans l'année 1543. Prônant l'expérimentation, l'ensemble de ses dissections pratiquées est résumé et se trouve à l'origine de son traité illustré de planches anatomiques.



Figure 14. Planches anatomiques de Vésale aux influences considérables sur la formation et la pensée médicale et biologique des XVI^e et XVII^e siècles, par la représentation anatomo physiologique du corps.²⁰⁹

Le corps humain figuré, inspire et représente le mouvement. Le squelette de l'homme se trouve dans une statique provisoire, sa pseudo-dynamique le tend vers le déséquilibre mû par sa musculature qui le déplace dans une sorte de kinogramme d'avant-garde. Vésale et son école, par les dissections répétées, donnent à l'étude des organes de la vie animale un tel développement, que cette partie domina dans tous les traités la description des organes de la vie végétative.

Dans la continuité de l'influence des représentations de Vésale, il convient de souligner l'œuvre de Heronymus Fabricius (ab Aquapendente) probablement initiatique aux hypothèses de la circulation sanguine. Il représente l'un des derniers représentants actifs de l'anatomie galénique en publiant au début du XVII^e siècle ses ouvrages sur les

²⁰⁹ Vésale A. *Les portraits anatomiques de toutes les parties du corps humain... ensemble, l'abrégé d'André Vésale et l'explication d'iceux, accompagnée d'une déclaration anatomique.* [Traduction Paris : BIUM, 2004] Paris : chez André Wechel, 1569.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

organes des sens, le larynx, la voix, le fœtus, la respiration, le mouvement et l'appareil digestif. En effet, Fabrice, élève et successeur de son professeur Gabriel Fallope, qui lui-même l'avait été de Vésale a été un éminent professeur d'anatomie chirurgien exceptionnel, présent pendant plusieurs décennies dans le corps enseignant médical à Padoue depuis 1537 sa connaissance se reflète dans ses nombreux travaux. Il crée pour l'enseignement un amphithéâtre qui deviendra un modèle pour les universités. Consulté en tant que médecin sur des problèmes non chirurgicaux, il a compté des personnes importantes comme patients, entre autres Galilée. Les découvertes de Fabrici sont nombreuses, mais sa découverte la plus notable est exposée dans la section 7 de son traité, *De venarum ostioliis* (sur les ostioles des veines), publiée en 1603. Il définit ces ostioles (valvules) comme de petites peaux internes aux veines qui ralentissaient le flux sanguin dans les vaisseaux périphériques des membres, avec cette conception des valvules veineuses, il s'oppose à la circulation telle que la concevait Galien. Elle fut le point de départ des études sur la circulation du sang de son élève le plus célèbre William Harvey, qui vécut pendant un certain temps chez lui.

Mettant largement à profit les travaux de ses prédécesseurs, confrontant ses propres recherches sur le cadavre humain et sur le corps d'animaux de différentes espèces (ruminants, poissons, reptiles, oiseaux), il s'attache particulièrement à l'étude des fonctions musculaires dans la phonation, la respiration, la digestion, la motilité pupillaire, l'accommodation et surtout la locomotion sous toutes ses formes. Il développe des hypothèses convenables pour son époque sur la mécanique animale très peu considérée en son temps.

Il a étudié très attentivement les deux traités aristotéliens sur le *Mouvement et la Marche des animaux* ; et il croit répondre à la pensée de l'un et de l'autre en intitulant le sien « *De motu locali animalium secundum totum* ». Par-là, Fabrice indique qu'il veut ne s'occuper que du mouvement où l'animal se déplace tout entier ; et il exclut les mouvements qui se passent intérieurement, comme ceux du cœur, du poumon, du sang et de toutes les sécrétions, des muscles, des nerfs, etc. Aristote avait aperçu cette distinction ; mais il ne l'avait pas faite avec autant de précision. C'est un traité systématique où de nombreuses divisions et subdivisions apparaissent à la manière d'Aristote qu'il cite souvent.

Bien qu'une partie de ses recherches fût consacrée à l'étude de l'embryologie, il a effectué des études approfondies sur la fonction musculaire et les mouvements osseux

associés à l'analyse de la locomotion. La première édition du travail final de Fabrici²¹⁰, *De motu locali animalium secundum totum...* apparaît en 1618, constituant un traité sur la locomotion animale et humaine, il est précurseur de 62 ans à la publication de *De motu animalium* de Borelli. Fabrici a examiné les mécanismes et la physiologie du mouvement, notamment la bipédie, mais aussi la locomotion des quadrupèdes et des insectes. Il s'est focalisé aussi sur le vol, la natation, et le rampement.

Fabrice étudie d'abord le mouvement de progression chez l'homme, et il s'aide de tous les secours que lui offre une anatomie déjà fort avancée par ses prédécesseurs et par lui-même ; il donne une description minutieuse des organes de la locomotion, et signale déjà une configuration de mouvement circulaire par lequel le pied déroule sur le sol. Il décrit les mouvements de la cuisse, du genou, de la jambe, des pieds et des doigts, accordant une part à chaque membre dans l'action totale du déplacement. Les mouvements, dit-il, se font en haut, en bas, en avant et en arrière, à droite et à gauche, et le mouvement composé qui s'opère en rond forme une septième espèce. Tous ces mouvements s'observent dans les os à tête ronde ; mais non dans ceux où la rondeur est imparfaite. Quand la jambe se porte en avant, les fléchisseurs agissent, et les extenseurs, quand elle se tient debout, en sorte qu'ils se reposent alternativement. Dans la marche la translation s'effectue par une jambe, et l'appui par l'autre. Toute translation de la jambe se réalise par flexion et par extension. Dans cet acte la jambe se fléchit et se porte en avant. Tandis que le transport d'une jambe s'accomplit, l'autre qui s'appuie à terre s'étend. Enfin, il est évident, selon Fabrice, que la marche consiste dans la translation et l'appui alternatif des jambes ; que la translation s'opère par la flexion des articulations, et l'appui par leur extension ; que l'extension et la flexion proviennent de l'action des muscles, et que telle est la série de ces phénomènes ; contraction des muscles, flexion et extension des orteils, translation, appui et marche. De la marche de l'homme, il traite celle des volatiles, et celle des quadrupèdes (*de gressu pennatorum, de gressu quadrupedum*). Enfin, il décrit longuement le vol des oiseaux et l'action des ailes, il termine par l'explication de la nage chez les poissons, et de la reptation chez les serpents. C'est finalement l'utilisation de la pensée aristotélicienne, avec plus d'ordre et avec des connaissances plus étendues, en anatomie et en physiologie. Fabrice les complète encore

²¹⁰ Fabrizio D'acquapendente Girolamo (Fabricius Hieronymus). *Œuvres chirurgicales de Jérôme Fabrize d'Acquapendente... divisées en deux parties dont la première contient le Pentateuque chirurgical l'autre, toutes les Operations manuelles, qui se pratiquent sur le corps humain*. Lyon : Jean-Antoine Huguetan et Guillaume Bastier, 1670.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

par des opuscules particuliers sur l'organisation, les fonctions et l'utilisation des muscles, sur les articulations des os, sur la respiration, et sur les mouvements du cœur et des intestins.

Son ouvrage sur la locomotion des animaux ne paraît qu'un an avant sa mort en 1619. C'est le fruit d'un long enseignement, qui rassemble et synthétise tout en corrigeant, l'opinion des anciens. Cette œuvre représente une conception de la science telle que la Grèce l'a conçue et pratiquée, observatrice avant tout, patiente autant que régulière, recueillant les faits et ne cherchant à en expliquer la cause qu'après les avoir constatés. La Sagesse de Dieu dans les œuvres de la nature y est recherchée comme symbole de perfection et de simplicité, la beauté émerge de ces deux axiomes.

Fabrice, dans ses enseignements, ne dissimule pas ce qu'il doit à Aristote, tout en rappelant qu'avant le philosophe, personne sérieusement ne s'était occupé de ce sujet. Ces travaux font honneur au développement de l'anatomie à l'université de Padoue. La démarche constituée des travaux d'illustres prédécesseurs comme principalement Vésale, Falope et tant d'autres, compare les structures des systèmes anatomiques et organiques dans un grand nombre de classes d'animaux. Fabrice avait le projet de faire paraître un grand traité d'anatomie à l'image de celui de Vésale comportant un nombre élevé de planches anatomiques en couleurs qu'il intitula : *Theatrum totius animalis fabricæ* organisé selon les propriétés de l'âme définie par Aristote comprenant l'étude des fonctions des âmes végétative, sensitive, rationnelle et locomotrice (section 8 sur le fonctionnement du muscle, section 9 sur les articulations des os ; section 11 sur le mouvement local des animaux). Dans la première moitié du XVII^e siècle, les hypothèses de la progression physiologique animale de Descartes et de Gassendi se démarquent tout en maintenant des correspondances anatomiques, mais soixante ans après Fabrice, vers la fin du XVII^e siècle, Giovanni Alfonso Borelli et Claude Perrault reprennent la question de la locomotion animale, en la traitant par des méthodes très différentes.

4. William Harvey

De l'aube de la renaissance à la fin du XVIII^e siècle, de nombreux savants mettent à l'épreuve les connaissances du passé. Ils mènent une lutte acharnée et passionnée, pour imposer les avancées de leurs recherches et découvertes. De la révolte contre la scolastique d'André Vésale par la dissection, au déclin progressif des doctrines provoqué par des découvertes qui remettent en question des suprématies ancestrales et incontestables. William Harvey montre les erreurs de conception sur la circulation dans

son ouvrage *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in animalibus* de 1628, mais déjà latente chez Andrea Michel Servet et Cesalpino. Il connaissait cette très grande découverte sur la circulation générale depuis 1619 pour la démontrer en 1628, après plusieurs expériences et l'enseignait dans ses leçons. Il tarda à l'imprimer, finalement avec raison, de peur des reproches et des oppositions vigoureuses. Cette « découverte de la circulation ne se fit que par degrés successifs ; & c'est ainsi qu'on a trouvé les choses, dont la recherche a été de quelques difficultés, Hippocrate parla du mouvement du sang d'une manière fort générale ; Platon dit ensuite que le cœur est la source des veines & de tout le sang qui se distribue dans les différentes parties du corps. Aristote joignit à ces idées celle du retour de ce fluide. Mais toutes ces choses jusque-là n'étaient qu'hypothétiques : la supposition étoit sensée & digne des personnages aussi intelligents. Il leur sembla que le sang devoit se mouvoir, & rien ne leur prouvoit ce mouvement : comme aucune expérience ne venoit à l'appui de ce qu'ils pensoient, un chacun trouva la même facilité à admettre où à nier leur supposition. Servet s'aperçut le premier que le sang passoit dans les poumons. Columbus avança un peu plus ; il connut l'usage des valvules ou des portes du cœur, de ces membranes, dont les unes ne permettent point la sortie & les autres le retour du sang. Césalpin en a parlé plus ouvertement, & il a donné des observations prises de l'ouverture des cadavres, & même des animaux vivans. »²¹¹ Harvey meurt en 1649, sans avoir pu convaincre tous ses adversaires. La circulation sanguine générale ne fut admise dans aucune Faculté avant 1650 c'est-à-dire un siècle après la publication de Michel Servet. Lentement on s'est orienté vers la connaissance d'un ordre naturel révélé plus logique par l'expérimentation et l'instrumentation ; où plus tard le télescope et le microscope ouvraient le regard sur l'infiniment grand et petit. Au seuil de ces balbutiements expérimentalistes, des méthodes et des techniques se sont développées pour se centrer sur le fonctionnement physiologique des organes et aller au-delà de la simple observation anatomique. Harvey qui ne croit qu'à l'expérience, au visible expérimental, fit des calculs pour prouver sa thèse de la circulation sanguine, il estime à 1/8^e du volume du ventricule gauche, la quantité de sang expulsée dans l'aorte à chaque systole. En une demi-heure (soit après 1000 systoles environ, mais assez souvent 2 ou 3000), il calcule que 4,3 litres de sang au moins (et jusqu'à 8 ou 10 litres parfois), soit la quantité totale de sang contenue dans le corps (ou une quantité supérieure), passait à travers le cœur. D'où venait et où allait tout ce sang ? Ne pouvait-il pas y avoir un mouvement circulaire ? Harvey conclut, à la fin de son ouvrage, *De motu cordis* : « Il nous est enfin permis de formuler ouvertement notre

²¹¹ Eloy N. F. J. *Dictionnaire historique de la médecine ancienne et moderne, ou mémoires disposés en ordre alphabétique pour servir à l'histoire de cette science et à celle des médecins, anatomistes, botanistes, chirurgiens et chimistes de toutes nations*. [4 tomes] Mons : H. Hoyois 1778, Tome 2, p. 456.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

*conception de la circulation du sang. Raisonement et expérimentation ont établi que le sang traverse les poumons et le cœur ; que, par celui-ci, il est envoyé à tout l'organisme ; qu'il passe dans les porosités des tissus et dans les veines ; qu'il revient par celles-ci des extrémités vers le centre, pour aboutir finalement dans l'oreillette droite du cœur. »*²¹²

Dans une histoire de la physiologie associée à celle de la description de la locomotion pour mieux la saisir, il est impossible de noter la découverte de concepts ou d'instruments nouveaux, ou bien de faire la chronologie de toutes les découvertes anatomiques. Mais nous devons insister sur les résultats des méthodes nouvelles, des procédés originaux qui, favorisés par plus d'indépendances, refoulaient peu à peu les anciennes erreurs. Un des événements les plus considérables pour l'époque est la découverte de William Harvey, qui renouvelait entièrement ce que l'on savait des vaisseaux.

Nicolas Stenon, l'ami de Swammerdam, tout aussi méritant, montrait que les muscles n'étaient pas de simples matériaux de remplissage ou des organes accessoires du tact (opinion encore répandue dans la seconde moitié du XVII^e siècle), mais des organes essentiels du mouvement. Il prouve que les muscles se raccourcissent eux-mêmes pendant la contraction. Borelli rapportera cette propriété fondamentale à l'élasticité du muscle, mis en activité par l'influence des nerfs.²¹³

En, 1627, William Harvey écrivit des notes pour la rédaction d'un traité sur le mouvement des animaux, *De motu locali animalium*, qui resta inachevé et jamais édité. Dans ce traité d'anatomie comparée, il examine des animaux assez rares, au moins pour son temps comme l'autruche et le casoar, grand oiseau coureur d'Australie. Son existence resta méconnue jusqu'à sa publication, en 1959²¹⁴, la contribution d'Harvey à l'étude de la physiologie du muscle est restée inaperçue²¹⁵. Cependant, dans ce traité, il traite les différents genres de locomotion animale et examine le rôle joué par les divers organes moteurs, les muscles et leurs éléments ainsi que les nerfs. Il est intéressé par les problèmes du mouvement de déclenchement, la complexité et la diversité du mouvement impliqué dans n'importe quelle action simple, ce que l'on perçoit aussi dans le Traité

²¹² Bitbol-Hesperies A. *Le Principe de vie chez Descartes*. [Chapitre XIV. Étude anatomique du mouvement du cœur et du sang chez les animaux.] Paris : J. Vrin, 1990, p. 180.

²¹³ Carus J. V. *Histoire de la zoologie depuis l'antiquité jusqu'au XIX^e siècle*. [Professeur d'anatomie comparée à l'Université de Leipzig. Traduction française par P.-O. Hagenmuller et notes de A. Schneider.] Paris : librairie J.-B. Baillière et fils, 1880, p. 319.

²¹⁴ Harvey W. *De Motu locali animalium*. [1627]. Edition traduite par Whitteridge, Gweneth. Cambridge: University press, 1959.

²¹⁵ Whitteridge G. The Wilkins Lecture of the local movement of animals. *Proceedings of the Royal Society of London*. Series B, Containing papers of a Biological character. Royal Society (Great Britain). 1979, 206, 1-13.

anatomique sur les mouvements du cœur et du sang chez les animaux « *Chez les animaux tous les mouvements se font d'abord localement et commencent par la contraction d'une partie quelconque. Aussi le sang est chassé dans les ventricules par la contraction des oreillettes, comme je l'ai montré, et de là il est lancé et poussé dans le corps par la contraction des ventricules. Quant au mouvement local et au principe immédiat du mouvement dans les actes de tous les animaux, peut-être est-ce l'esprit moteur, comme le dit dans son livre *De spiritu* et ailleurs, qui devient contractile, de même que *νεύρον* vient de *νέω* (je plie, je contracte) »²¹⁶. Bien qu'il ne puisse aboutir à aucune conclusion satisfaisante pour aucun de ces problèmes, la qualité de ses observations et des questions qu'il pose justifieront un examen de ses prises de position par les physiologistes du muscle du XVII^e siècle. Il est évident que le *De Motu locali animalium*, représente un document en quelque sorte sur la préhistoire de la physiologie du muscle, en référence aux études d'Aristote, Galien et Fabrice d'Acquapendente ; mais rend sensible à la coexistence de deux méthodes pour élucider des problèmes d'anatomo-physiologie, l'une expérimentale quant il s'agit d'aborder les mouvements du cœur, l'autre livresque pour traiter des mouvements de locomotion. Sa logique est basée principalement sur un raisonnement quantitatif. À l'image des sciences préliminaires, mathématique, astronomie, physique, chimique, la physiologie s'élabore progressivement pour obtenir un statut scientifique. Elle est restée pendant longtemps une science isolée ; définie par Albrecht Von Haller comme « *Anatome animata* », elle semblait n'être abordable qu'à de rares initiés. Progressivement sans négliger les études anatomiques qui lui servent de point de départ, la physiologie donne la main aux autres sciences ; elle emprunte leurs concours pour étudier les phénomènes physiques, chimiques ou mécaniques, dans les organes et dans les tissus vivants pour trouver l'origine du mouvement, mais aussi comprendre son trajet jusqu'à l'acte musculaire depuis la fonction nerveuse considérée comme une partie insaisissable et très mystérieuse de la biologie.*

5. René Descartes

Le passage de l'étude de l'animal mort ou vif a conduit l'anatomiste à comparer les systèmes isolés, dont il avait élaboré certaines représentations, aux modèles mécaniques dont il percevait l'utilisation dans sa vie de tous les jours. De telles comparaisons donnaient l'avantage de pouvoir déduire des analogies entre les usages et

²¹⁶ Richet C. Harvey. *La circulation du sang. Des mouvements du cœur chez l'homme et chez les animaux.* Deux réponses à Riolan. [Chapitre dix-septième. Confirmation du mouvement et de la circulation du sang par ce que nous voyons dans le cœur, et par les observations anatomiques.] Paris : G. Masson, 1879, p. 169-170.

les formes pour expliquer l'inconnu par le connu. Dans la transition du XVI^e au XVII^e siècle pour l'anatomiste puis le physiologiste la vie est un fait unique et principalement mécanique. Ce qui est curieux dans ce contexte « [...] c'est que la machine cartésienne ait pu susciter l'enthousiasme et que les principes explicatifs de Descartes aient pu devenir le point de départ d'une véritable école. »²¹⁷ Car il n'y a dans l'œuvre de René Descartes rien de comparable aux avancées qu'a générées la découverte sur la circulation sanguine de William Harvey, mais il faut sans doute chercher sa notoriété scientifique dans sa manière d'aborder l'acquisition des connaissances et leurs remises en question permanentes par la rationalité. Pour Descartes les lois du vivant ne diffèrent pas fondamentalement des autres lois physiques de l'univers où le rationaliste peut s'appliquer. La raison, qui s'oppose à l'imagination et à l'inspiration devient un principe fort sur lequel repose cette démarche qui deviendra une doctrine classique, selon laquelle les idées et les choses doivent s'exprimer de façon quantitative ce qui était peu fréquent jusqu'alors. C'est avec le XVII^e siècle que se met en place la conception mécaniste moderne du corps humain qui doit beaucoup à la pensée de René Descartes. Dans ses ouvrages majeurs (*Méditations métaphysiques*, *Discours de la méthode*, *Traité sur l'homme*), il n'affirme pas que le corps soit une simple machine dont le fonctionnement s'explique uniquement par les lois physiques du mouvement. Il pense concevoir une machine, un automate capable d'effectuer des mouvements semblables aux nôtres. Pour René Descartes dont « *Le mouvement est quelque chose de très simple ce qui le complique c'est qu'il est quelconque* » s'efforce dans l'étude physiologique du corps humain à éclaircir deux points essentiels : le mécanisme de la pulsation cardiaque et le mécanisme de l'union de l'âme et du corps dans le cerveau plus exactement la glande pinéale hypothétique « *siège principal de l'âme* ». Ses deux principaux ouvrages de physiologie qui traitent des êtres vivants et écrits en français s'intitulent *Traité de l'homme* et *Description du corps humain*, avec le sous-titre *De la formation de l'animal*. Le projet de Descartes est de faire progresser les connaissances en médecine en expliquant tous les mouvements corporels par la disposition des organes et les lois de la mécanique. Pour cela, il a recours à la consultation des textes anciens, mais aussi à la dissection ainsi qu'à une conception automate de l'homme et de l'animal. Descartes, dans son *Traité de l'homme*, conçoit

²¹⁷ Guyenot É. *L'évolution de la pensée scientifique. Les sciences de la vie aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris : A. Michel, 1941, p. 158.

celui-ci comme une machine vivante, on perçoit comment l'auteur s'efforce d'établir des rapports entre sa métaphysique et certaines notions de physiologie :

« Ces hommes seront composés, comme nous, d'une âme et d'un corps [...]. Je suppose que le corps n'est autre chose qu'une statue ou machine de terre [...] Pour ce qui est des parties du sang qui pénètrent jusqu'au cerveau, elles n'y servent pas seulement à nourrir et entretenir sa substance, mais principalement aussi à y produire un certain vent très subtil, ou plutôt une flamme très vive et très pure, qu'on nomme les esprits animaux : car il faut savoir que les artères qui les apportent du cœur, après s'être divisées en une infinité de petites branches et avoir composé ces petits tissus qui sont étendus comme des tapisseries dans les concavités, et ont en cet endroit-là un grand nombre de petits trous par où les plus subtiles parties du sang qu'elles contiennent peuvent écouler dans cette glande, mais qui sont si étroits qu'ils ne donnent aucun passage aux plus grossières. [...] Or, à mesure que ces esprits entrent ainsi dans les concavités du cerveau, ils passent de là dans les pores de sa substance, et de ces pores dans les nerfs ; où selon qu'ils entrent, ou même seulement qu'ils tendent à entrer plus ou moins dans les uns que dans les autres, ils ont la force de changer la figure des muscles en qui ses nerfs sont insérés, et par ce moyen de faire mouvoir tous les membres. Ainsi que vous pouvez avoir vu dans les grottes et les fontaines qui sont aux jardins de nos rois, que la seule force dont l'eau se meut en sortant de sa source soit suffisante pour y mouvoir diverses machines, et même pour les y faire jouer de quelques instruments, ou prononcer quelques paroles, selon la diverse disposition des tuyaux qui la conduisent. Et véritablement l'on peut fort bien comparer les nerfs de la machine que je vous décris aux tuyaux des machines de ces fontaines, ses muscles et ses tendons aux autres divers engins et ressorts qui servent à les mouvoir, ses esprits animaux à l'eau qui les remue, dont le cœur est la source, et dont les concavités du cerveau sont les regards. De plus, la respiration et autres actions qui lui sont naturelles et ordinaires, et qui dépendent du cours des esprits, sont comme les mouvements d'une horloge ou d'un moulin, que le cours ordinaire de l'eau peut rendre continus. Les objets extérieurs, qui, par leur présence, agissent contre les organes de ses sens, et qui par ce moyen la déterminent à se mouvoir en plusieurs diverses façons, selon que les parties de son cerveau sont disposées, sont comme des étrangers qui, entrant dans quelques-unes des grottes de ces fontaines, causent eux-mêmes sans y penser les mouvements qui s'y font en leur présence ; car ils n'y peuvent entrer qu'en marchant sur certains carreaux tellement disposés que, par exemple, s'ils approchent d'une Diane qui se baigne, ils la feront cacher dans des roseaux ; et s'ils passent plus outre pour la poursuivre, ils feront venir vers eux un Neptune, qui les menacera de son trident ; ou s'ils vont de quelque autre côté, ils en verront sortir un monstre marin qui vomira de l'eau contre la face, ou choses semblables, selon le caprice des ingénieurs qui les ont faites. Et, enfin, quand l'âme raisonnable sera en cette machine, elle y aura son siège principal dans le cerveau, et sera là comme le fontainier, qui doit être dans les regards où se vont rendre tous les tuyaux de ces machines, quand il veut exciter, ou empêcher, ou changer en quelque façon leurs mouvements. »²¹⁸

Descartes avait déjà, dans le *Traité des passions*, désigné comme le siège de l'âme la glande pinéale, la seule partie du cerveau qui ne soit pas double, faisant y arriver la connaissance des notions sensibles. Selon lui, l'homme pourrait être mis en équation, mais Descartes ignore l'expérimentation, qu'il juge secondaire. Néanmoins, il fait germer ce qui deviendra la iatomécanique, la biométrie, la biophysique et la biomécanique. Si l'assimilation de l'organisme à une machine remonte à Aristote, elle trouve une expression achevée dans la théorie cartésienne de l'animal-machine, reprise par La Mettrie, à une époque où le machinisme est en plein essor et où la mécanique fournit un modèle d'explication pour tous les phénomènes de la nature, dont on trouve un exemple métaphorique dans l'assimilation du fonctionnement de l'appareil sensitif et moteur du système nerveux à la mécanique d'un orgue :

²¹⁸ Cousin V. *Œuvres de Descartes. Tome IV. Traité de l'homme*. Paris : chez F. G. Levrault, 1824, p. 335-349.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

« Si vous n'avez jamais eu la curiosité de voir de près les orgues de nos églises, vous savez comment les soufflets y poussent l'air en certains réceptacles qui, ce me semble, sont nommés à cette occasion les porte-vents, et comment cet air entre de là dans les tuyaux, tantôt dans les uns, tantôt dans les autres, selon les diverses façons que l'organiste remue les doigts sur le clavier : or vous pouvez ici concevoir que le cœur et les artères qui poussent les esprits animaux dans les concavités du cerveau de notre machine sont comme les soufflets de ces orgues qui poussent l'air dans les porte-vents ; et que les objets extérieurs, qui, selon les nerfs qu'ils remuent, font que les esprits contenus dans ces concavités entrent de là dans quelques-uns de ces pores, sont comme les doigts de l'organiste, qui, selon les touches qu'ils pressent, font que l'air entre des porte-vents dans quelques tuyaux. Et comme l'harmonie des orgues ne dépend point de cet arrangement de leurs tuyaux que l'on voit par-dehors, ni de la figure de leurs porte-vents ou autres parties, mais seulement de trois choses, savoir de l'air qui vient des souffles, des tuyaux qui rendent le son, et de la distribution de cet air dans les tuyaux, ainsi je veux vous avertir que les fonctions dont il est ici question ne dépendent aucunement de la figure extérieure de toutes ces parties visibles que les atomistes distinguent en la substance du cerveau, ni de celles de ses concavités, mais seulement des esprits qui viennent du cœur, des pores du cerveau par où ils passent, et de la façon que ces esprits se distribuent dans ces pores : si bien qu'il est seulement ici besoin que je vous explique par ordre tout ce qu'il y a de plus considérable en ces trois choses. »²¹⁹

Tout au long des siècles, cette mécanique humaine et animale a attiré l'attention des hommes de science. La comparaison des animaux aux machines n'est pas seulement légitime, elle permet d'appréhender les phénomènes mécaniques qui agissent chez les êtres vivants. Les anciens anatomistes et physiologistes se représentaient les organismes vivants et notamment les animaux comme des machines où les leviers, les poulies, les cordages, les pompes et les soupapes avaient leurs rôles bien définis dans l'explication des phénomènes de la vie et plus exactement du mouvement. Le jeu de ces appareils est souvent décrit sous le nom de mécanique animale dans un grand nombre de traités classiques.

L'élaboration du modèle mécanique de la vie permet de légitimer au niveau théorique l'utilisation technique de l'animal et l'assujettissement de la nature tout entière aux fins de la raison humaine. Si l'animal peut être considéré de manière réductrice comme une « machine », pour reprendre la théorie des animaux-machines de Descartes, les fonctions locomotrices musculaires restent d'une très grande complexité. C'est dans *Les Passions de l'âme* que l'on trouve un exposé du processus de la contraction musculaire :

« Car la seule cause de tous les mouvements des membres est que quelques muscles s'accourcissent et que leurs opposés s'allongent, ainsi qu'il a déjà été dit ; et la seule cause qui fait qu'un muscle s'accourcit plutôt que son opposé est qu'il vient tant soit peu plus d'esprit du cerveau vers lui que vers l'autre. Non pas que les esprits qui viennent immédiatement du cerveau, mais ils déterminent les autres esprits qui sont déjà dans ces deux muscles à sortir tous fort promptement de l'un d'eux et passer dans l'autre : au moyen de quoi celui d'où ils sortent devient plus long et plus lâche ; et celui dans lequel ils entrent, étant promptement enflés par eux, s'accourcit, et tire le membre auquel il est attaché. Ce qui est facile à concevoir, pourvu que l'on sache qu'il n'y a que fort peu d'esprits animaux qui viennent continuellement du cerveau vers chaque muscle, mais qu'il y en a toujours quantités d'autres, enfermées dans le même muscle, qui s'y meuvent très vite, quelquefois en tournoyant seulement dans le lieu où ils sont, à savoir lorsqu'ils ne trouvent point de passages ouverts pour en sortir, et quelquefois en coulant dans le muscle opposé, et d'autant qu'il y a de petites ouvertures en chacun de ces muscles, par où ces esprits peuvent couler de l'un vers l'autre, ils ouvrent toutes les entrées par où les esprits de l'autre muscle peuvent passer en celui-ci, et ferment en même temps toutes celles par où les esprits de celui-ci peuvent

²¹⁹ *ibid.*, p. 386.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

passer en l'autre : au moyen de quoi tous les esprits contenus auparavant en ces deux muscles s'assemblent en l'un d'eux fort promptement et ainsi l'enflent et l'accourcissent, pendant que l'autre s'allonge et se relâche. »²²⁰

La connaissance du corps humain a représenté une quête permanente pour valider certains principes et lois mécaniques ou biologiques. Chez Descartes, sa physiologie considère le vivant comme une machine, en prenant pour modèle l'automate dont le fonctionnement doit s'expliquer, en minimisant la référence à l'âme et tout en se centrant sur la mécanique des parties organiques. La vie est en ce sens corporelle et matérialisée en des mouvements programmés logiquement comme la circulation du sang transportant la chaleur du principe de vie du cœur. Il serait donc possible de montrer que l'on peut concevoir une machine, semblable à nous et capable de mouvements identiques aux nôtres. Les recherches de Descartes s'interpellant sur les phénomènes de la vie aboutissent à des explications scientifiques machiniques qui tirent profit des notions théoriques et techniques développées par les courants de la mathématique et de la physique mécanique. L'évolution des connaissances dans ces champs de pensées a profité à d'autres comme la physiologie. La mécanique animale à la croisée des autres modèles de pensées et de méthodes a émergé en construisant progressivement et par bonds successifs son statut. Le profil historique de l'étude du mouvement s'est déterminé sur plusieurs disciplines scientifiques entre autres, l'anatomie, la physique mécanique, la médecine et la physiologie.

6. Pierre Gassendi

Dans ce contexte historique, une partie de l'œuvre de Pierre Gassendi centrée sur l'étude analytique du déplacement animal et humain et notamment celle spécifique de la marche montre une autre manière d'envisager le déplacement. Adversaire de la métaphysique cartésienne, considérée comme artificielle et paradoxale, il propose sa conception de la physiologie motrice où l'âme cette fois tient une place prépondérante. Cette âme est considérée comme un principe inné, une flamme allumée pendant la vie, qui s'éteint lors de la mort. Sa recherche des causes des phénomènes est indissociable du regard théologique où les finalités sont nées de la volonté du grand Ingénieur, mais aussi marquées par un mécanisme radical se référant à des structures atomiques. La logique du modèle de la contraction musculaire entraînant le mouvement et la locomotion, sa manière de la présenter laisse pressentir dans sa constitution l'influx nerveux :

²²⁰ *ibid.*, p. 46-47.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

²²¹[...], mais avant que de parler de la diversité de ces mouvemens, il nous faut premièrement dire quelque chose de la Vertu Motrice mesme, de l'endroit où elle reside, & des organes dont elle se sert.

Pour tenir donc cette methode, il semble que la force mouvante, ou la Vertu-Motrice se doit prendre de la nature mesme, & de la contexture de l'Ame. Car si les raisons que nous avons apportées pour montrer que l'Ame est de nature ignée sont quelque chose, il est constant que la Vertu-motrice dont l'Ame est douée n'est autre chose que celle du feu mesme, qui par sa vigueur, ou mobilité naturelle se meut premierement luy mesme, & puis les autres corps contre lesquels il hurte, comme il arrive dans les Canons, qui est l'exemple sensible que nous en avons apporté. Il est vrai que cette mobilité pourroit peut estre anterieurement estre rapportée aux corpuscules, ou aux Atomes dont le feu est formé, ce mouvement leur estant naturel ; mais il suffit icy de la rapporter aux esprits, qui estant de nature ignée, & par consequent tres mobiles, sont à raison de cette mobilité propres à pousser, & à mouvoir le corps, & ses parties : Je dis à raison de cette mobilité ; car comme nous avons montré en son lieu, il n'est pas possible qu'un corps imprime du mouvement à un autre, qu'il ne soit luy-mesme en mouvement, c'est-à-dire qu'il ne soit luy-mesme dans l'agitation ; de sorte que la Vertu-motrice par le moyen de laquelle l'Animal est meu semble n'estre par consequent que la mobilité mesme, ou le mouvement mesme des esprits.²²²

Pour ce qui regarde le Siege de cette force, ou le principe d'où elle decoule, l'on trouve la mesme diversité d'opiniós qu'à l'égard du Siege de la Phàtaisie, de la Raison, & de l'Appetit ; car comme on demeure presque d'accord que les esprits destinez pour mouvoir sont transmis par les nerfs, ceux qui tiennent avec Aristote que le Cœur est le principe des nerfs, tiennent aussi que la faculté motrice reside dans le Cœur, & ceux au contraire qui soutiennent avec Galien que les nerfs tirent leur origine du cerveau, la placent conséquemment dans le Cerveau : Or l'Anatomie nous ayant fait voir évidemment que le Cerveau est le principe des nerfs, & non pas le Cœur, nous supposerons comme une chose évidente que le Siege, ou le principe d'où la vertu motrice decoule est le Cerveau, & non pas le Cœur ; de sorte que sans nous arrêter davantage sur cette difficulté nous parlerons seulement de l'Organe dont se sert la Faculté-motrice.²²³

Il est comme évident que le Muscle est l'organe immédiat du mouvement volontaire, mais parce qu'outre sa chair, sa membrane, & son ligament, il est pourveu de veine, d'artere, de nerf, qui luy portent chacun de leurs principes le sang, les esprits vitaux, & les esprits animaux, l'on est en peine de sçavoir lequel de ces trois derniers peut estre l'organe mediate de ce mouvement. Or l'on a observé que cela appartient specialement au nerf ; parceque la veine, ou l'artere ayant esté liée, ou coupée au-dessus de son insertion dans le muscle, le mouvement ne laisse pas de subsister dans le muscle ; au lieu que le nerf ayant esté lié, ou coupé, le mouvement s'evanouit entierement, quoy qu'il demeure dans les parties superieures, c'est-à-dire depuis la section jusques au Cerveau, ou à la moëlle de l'epine, qui n'est autre chose, comme nous avons dit ailleurs, que le Cerveau mesme allongé. Joint que lorsque cette moëlle de l'epine a esté coupée, le mouvement perit dans les nerfs qui sortent au dessous de la section ; ce qui est une marque que la vertu motrice qui influe de la moëlle dans les nerfs, influe du cerveau dans la moëlle ; & de là l'on a conclu, non seulement que le Cerveau doit estre le Siege de la vertu motrice, mais que c'est particulièrement par les nerfs que son influence est transmise aux parties qui doivent estre meües. Mais on est en peine de sçavoir en quel sens cela se doit prendre. [...] Que dirons-nous donc qui vienne du cerveau au muscle par l'entremise du nerf faute dequoy le muscle soit rendu incapable de mouvoir ? Certainement il semble que ce n'est autre chose que le commandement de mouvoir qui par l'arrivée des esprits transmis par le nerf soit comme signifié au muscle, de façon que le muscle sans cet abord d'esprits demeure comme endormi, au lieu qu'estant par là excité, & comme reveillé, il agisse. [...] ²²⁴

Pierre Gassendi dans ses études sur la marche des animaux observe l'influence de la longueur du pied sur la grandeur du pas ; mais il croit que, dans la marche, le tronc se trouve porté en avant dans un plan entièrement horizontal. Mais c'est avec Gassendi que l'on trouve l'idée de l'assimilation du mouvement des membres supérieurs de l'homme avec celui des membres antérieurs des quadrupèdes. Il a observé, après Fabrice,

²²¹ Bernier F. *Abrégé de la philosophie de Gassendi*. Seconde Edition, Tome VI, Livre VI. De la Faculté-Motrice des animaux, & de leurs différentes Motions ou Mouvemens. Lyon : chez Anisson, Posuel & Rigaud, 1684, p. 487-583.

²²² *ibid.*, p. 488.

²²³ *ibid.*, p. 488-489.

²²⁴ *ibid.*, p. 489-492.

les deux mouvements circulaires en sens contraire, que le pied exécute sur sa pointe avant le transport de la jambe et sur son talon après ce transport²²⁵. Mais il s'est trompé en disant que le talon de la jambe qui se porte en avant n'achevait sa révolution et le pied son application sur le sol, que, lorsque la jambe restant en arrière s'est détachée de la terre et se porte en avant.

7. Claude Perrault

Mais ce n'est pas tout, Claude Perrault relevait déjà en empruntant une partie de son raisonnement dans le livre I des *Parties des animaux*²²⁶ à Aristote une autre dimension à l'histoire : « *comme il y a deux manieres de connoistre & d'expliquer les choses de la nature, dont l'une qu'on appelle Historique consiste dans le denombrement & dans la description de toutes les particularitez qui peuvent estre connuës par les sens ; & une autre qu'on nomme Philosophique, qui tasche de découvrir par le raisonnement les causes & les raisons cachées de toutes ces particularitez ; ce n'est pas sans sujet que cette seconde espece de recherche n'est considerée que comme une divination en ce qui regarde la plupart des causes naturelles des estres inanimés ; parce qu'il n'y a guere que celles des actions des animaux qui puissent estre connuës bien clairement, la nature y employant des machines qui se peuvent demonter par le moyen de la dissection qui en fait voir toutes les pièces distinctement & separement : au lieu que l'analyse des estres ne fait jamais rien voir que de confus.* »²²⁷

En France, Claude Perrault²²⁸ médecin anatomiste et membre de l'Académie royale des sciences dès sa création en 1666, soutient la théorie du « iatromécanisme », qui consiste en une conception très mécanique de l'être vivant et de son fonctionnement, et celle de la « panspermie », selon laquelle la vie sur terre proviendrait de petits corps (germes animaux et végétaux) présents en nombre infini dans l'univers. Passionné par l'architecture des corps, il l'applique à l'anatomie comparée. Il conçoit la *Colonnade du Louvre* (1667-1674), *l'Observatoire de Paris* (1667-1672) et *l'Arc de triomphe* du

²²⁵ Barthez P.-J. *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*. Carcassonne : Imprimerie de Pierre Polere, 1798. p. 52.

²²⁶ Aristote. *Parties des animaux*. Livre I. Traduction de Jean-Marie Le Blond, introduction de Pierre Pellegrin. Paris, Aubier, 1945. Flammarion, 1995 pour l'introduction. Chapitre premier : De la méthode en biologie « *En tout ordre de connaissance et de recherche, la plus simple comme la plus haute, il semble qu'il y ait deux sortes d'attitudes ; on nommerait bien la première, science de l'objet, et l'autre, une sorte de culture. Car c'est bien le fait d'un homme cultivé que d'être apte à porter un jugement qui tombe juste sur la manière correcte ou non, suivant laquelle on fait un exposé ; c'est même à ce signe que nous reconnaissons la culture générale, et le résultat de l'éducation est précisément cette aptitude.* » p. 37.

²²⁷ Perrault C. *Essais de physique, ou recueil de plusieurs traités touchant les choses naturelles*. Tome III. Paris : chez Jean Baptiste Coignard, imprimeur ordinaire du Roy, 1680, p. 8-9.

²²⁸ Perrault C. *Essais de physique ou recueil de plusieurs traités touchant les choses naturelles*. [4 tomes, Tome III : De la mécanique des animaux.] Paris : J. B. Coignard, 1680-1684.

faubourg Saint-Antoine (1670) tout en publiant de nombreux ouvrages parmi lesquels une traduction des œuvres de Vitruve, mais aussi les Mémoires pour servir à l'histoire naturelle des animaux (1676) et un ouvrage suivant qu'il intitule : *De la mécanique des animaux* (1680), dont il se garde finalement de faire de la géométrie ; c'est uniquement de physiologie et d'anatomie qu'il s'occupe²²⁹. Un ouvrage estimé dans son temps, dont Albrecht von Haller fera de justes critiques.

L'ouvrage est divisé en trois parties : la première traite des organes des sens ; la seconde, des organes du mouvement ; et la dernière, des organes de la nutrition, aboutissant à la génération. Perrault présente d'abord quelques considérations générales ; et pour éviter l'équivoque que pourrait causer le titre de son ouvrage, il déclare qu'il ne regarde pas les animaux comme de pures machines ; il avertit ses lecteurs qu'il entend par animal un être doué de sentiment, et capable d'exercer les fonctions de la vie par un principe que l'on appelle Âme ; cette âme conduit toutes les pièces de la machine animale, comme l'organiste conduit l'orgue qu'il touche. « *Pour empêcher le mauvais effet, que l'équivoque & l'ambiguïté du titre de cet Ouvrage pourroit produire dans l'esprit de ceux qui ont entendu dire que la plûpart des Animaux sont de pures machines, & qui auroient lieu de croire que l'on a voulu traiter ce Problème, j'avertis que j'entens par Animal un être qui a du sentiment, & qui est capable d'exercer les fonctions de la vie par un principe que l'on appelle ame; que l'ame se sert des organes du corps, qui sont de véritables machines, comme étant la principale cause de l'action de chacune des pièces de la machine; & que bien-que la disposition, que ces pièces ont à l'égard les unes des autres, ne fasse guere autre chose par le moyen de l'ame, que ce qu'elle fait dans les pures machines, toute la machine néanmoins a besoin d'être remuée & conduite par l'ame de même qu'un orgue, laquelle quoique capable de rendre des sons differens, par la disposition des pièces dont elle est composée, ne le fait pourtant jamais que par la conduite de l'Organiste.* »²³⁰

Selon Claude Perrault, le mouvement a été donné à l'animal pour rechercher ou fuir ce qu'il a connu par les sens. Il distingue dans l'animal deux sortes de mouvements : l'un qui est obscur, comme celui de la sensation et de la digestion ; l'autre qui est manifeste, comme celui de la progression, ou à l'intérieur, celui de la respiration, de la voix et de la circulation. Les organes du mouvement sont les fibres des muscles, dont le raccourcissement, qui est assez difficile à expliquer, met les membres et les articulations en jeu : « *La contraction est l'action la plus commune des fibres qui servent au mouvement. Car les fibres des muscles causent le mouvement des membres lorsque venant à s'acourcir & rendant le muscle plus court, il arrive necessairement que deux os dont l'articulation fait un angle, sont cause que la*

²²⁹ Tome II, 3^e volume de l'édition de Leide, in-4^o, 1721.

²³⁰ *ibid.*, p. 329.

Partie I. Chapitre 3. Compromis théoriques sur la progression animale

*partie est pliée ; par la raison que le muscle estant attaché à un des os par un bout, & à l'autre os par l'autre bout, lors qu'il s'acourcit, il fait approcher les extremités opposées à celles par lesquelles l'articulation est faite.*²³¹ Les muscles sont en général fixés sur les os ; mais dans quelques animaux, comme les écrevisses, les muscles sont situés en dedans des parties dures, qui font tout ensemble fonction d'os et de peau.

La progression est très diverse selon les espèces, « *le roulement dans les huitres ; le traisnement dans les limaçons, les vers de terres &c ; le rampement dans les serpens ; la traction dans les polypes & dans les seches* », mais « *les animaux terrestres ont une progression plus commode, & plus parfaite que ne sont les quatre autres dont il a été parlé ; parce qu'elle les fait tourner plus aisément & plus promptement de tous les costez* »²³² et dont les pieds et les ongles sont appropriés à une foule d'usages sans oublier jusqu'au vol des oiseaux, dont les ailes sont une des merveilles les plus étonnantes de la nature, et enfin, jusqu'au nagé des poissons, qui a beaucoup de rapport au volé des oiseaux. Les organes de la progression servent en outre à l'animal pour se défendre ou pour l'attaque, tout aussi bien que les dents et les cornes.

Pour Claude Perrault, c'est le cerveau qui est le premier principe du mouvement : « *Après avoir expliqué par quelle mécanique chaque partie exerce les fonctions des sens & du mouvement ; il reste à parler de l'organe qui est estimé le premier mobile, & le siege de la puissance, qui fait agir les autres. La tête, ou plutost le Cerveau qu'elle enferme, est cette partie si noble & si importante, & non seulement les anciens philosophes ont considerée comme le principe des sens & du mouvement, mais à qui mesme la plupart des modernes attribuent la cause de la nourriture.* »²³³ Telles sont à peu près les théories de Claude Perrault sur le mouvement animal ; elles ne sont pas absolument originales ; mais elles sont fondées sur des recherches anatomiques étendues, où Perrault se faisait aider par ses amis. On a peut-être exagéré la valeur de ces théories en plaçant Claude Perrault à côté de Cuvier, ainsi que l'on fait certains physiologistes contemporains de cette époque. Sa part n'est pas aussi grande ; et si l'on se souvient des travaux antérieurs d'Aristote, de Fabrice puis de Borelli, les siens perdent un peu de leur importance, bien qu'ils restent intéressants. Claude Perrault est trop instruit pour ne pas connaître les ouvrages physiologiques d'Aristote, il cite même le philosophe une ou deux fois ; mais il ne semble pas accorder au père de la science tout l'intérêt qui lui est due. D'ailleurs, il admire autant qu'Aristote les œuvres de la nature

²³¹ *ibid.*, p. 71.

²³² *ibid.*, Chapitre III. Du mouvement manifeste des Animaux, principalement de leur progression. La Marche dans les animaux. p. 91.

²³³ *ibid.*, Chapitre VII. Du cerveau, premier principe du mouvement. p. 153.

et il se trouve en parfait accord avec le païen qui l'avait précédé de si loin dans cet hommage de la raison. On accorde à Claude Perrault d'avoir été un initiateur à publier des dissections animales²³⁴. Et, grâce à ce travail novateur, de nombreux préjugés accrédités par les anciens les plus respectables sont révisés. Il s'avère très rigoureux, chaque dissection commence par une description de l'animal suivie des différentes phases de la dissection et d'une illustration gravée. Le scientifique décédera emporté par sa passion lors d'une infection contractée en 1688, après avoir disséqué un chameau au Jardin des Plantes.

Pendant la dernière phase de l'évolution moderne, le développement de l'anatomie et de la physiologie se trouve admirablement favorisé par un perfectionnement des sciences servant de préliminaire à la physiologie. L'analyse physico-mathématique vient coordonner les conceptions de l'anatomie fonctionnelle et de la physiologie, alors que dans un passé malgré tout récent, l'anatomie ne pouvait que rassembler des matériaux, et ce malgré l'impulsion physiologique de Harvey, l'étude des êtres organisés était soumise aux explications mécaniques et ontologiques.

La philosophie de Descartes ouvrait la voie à l'application des concepts et méthodes physico-mathématiques de l'étude du mouvement des corps vivant dont Galilée, qui exploitait la mécanique expérimentale pour répondre à ses interrogations, fera figure de pionnier. La démarche physico-mathématique nommée ainsi au cours des premières années du XVII^e siècle comme pour marquer une nouvelle discipline, sera appliquée à la compréhension du mouvement des êtres vivants par le savant italien, Giovanni Alfonso Borelli ²³⁵, élève du savant Benedetto Castelli, centré sur des problématiques hydrauliques qui eut lui-même Galilée comme maître. Il poursuit dans la voie inaugurée par Castelli, mais à un moindre niveau que deux autres élèves Evangelista Torricelli et Bonaventura Francesco Cavalieri. Il formule sa doctrine iatomécanique du corps humain dont le but est d'établir les rapports existant entre les fonctions animales et les lois physiques et mathématiques : les forces musculaires du squelette constituent un ensemble de leviers et de marteaux qui obéissent aux lois mathématiques, mécaniques ou statiques, tandis que la circulation du sang répond aux

²³⁴ Perrault C. *Description anatomique d'un caméléon, d'un castor, d'un dromadaire, d'un ours et d'une gazelle*. Paris : Léonard, 1669.

²³⁵ Thurston A. J. Giovanni Borelli and the study of movement: an historical review. *Australian and New Zealand Journal of Surgery*. 1999, vol. 69, n° 4, p. 276-288.

principes de l'hydraulique; la digestion, par exemple, est considérée comme une simple action mécanique de trituration, dont la phase initiale est la mastication.

8. John Wallis

Problématique du centre de gravité dont selon John Wallis « ceux qui marchent en frappant la terre avec le plus de bruit et de force, sont tous ceux qui, ayant en l'air le pied qu'ils avancent, déplacent leur centre de gravité dont la direction cesse d'être perpendiculaire sur l'autre pied, de telle sorte que ce centre commence à tomber, jusqu'à ce qu'il soit arrêté dans sa chute par le pied avancé, lorsque ce pied vient à toucher le sol »²³⁶. Dans la marche, le centre de gravité commence à chaque pas à tomber, et sa chute est arrêtée à chaque pas dès son origine par la position du pied de devant sur le sol. Ce phénomène par conséquent ne s'observe pas seulement chez ceux qui marchent pesamment, et dont le bruit des pieds contre la terre est moins dû à la chute du centre de gravité subitement arrêté qu'au choc violent qu'ils produisent par la brusque extension et fixation de la jambe, comme l'application simultanée de toute la plante du pied sur le sol.

Cette prise en considération du centre de gravité, initialement mesuré statique sur l'homme au XVII^e siècle, se révélera un atout majeur lors du calcul dynamique de son déplacement pendant la locomotion et accessible avec les débuts de la stroboscopie et de la cinématographie du XIX^e siècle pour mesurer le travail effectué. Car comme le souligneront les frères Weber :

« pour déterminer les forces à l'aide desquelles s'accomplit la marche et déduire de là, selon les conditions extérieures données, des organes locomoteurs, quels sont les mouvements qui ont lieu pendant cette dernière, il faut non seulement observer les mouvements que le corps exécute durant la marche, et leur succession, mais encore mesurer ces mouvements et les rapports extérieurs des organes qui les accomplissent. Il faut connaître la durée de chaque pas, ou le nombre des pas dans un temps donné ; leur longueur, ou leur nombre sur un espace d'une étendue donnée ; le temps qu'une jambe reste flottante et suspendue pendant la durée d'un pas ; l'inclinaison que le corps éprouve durant la marche ; enfin les changements que toutes ces grandeurs subissent lorsque la vitesse avec laquelle on marche ou l'on court vient à changer. Il faut aussi connaître la longueur des membres locomoteurs et leurs segments, les raccourcissements et allongements que la jambe peut éprouver et éprouve réellement, dans la marche et la course, par l'effet de la flexion et de l'extension. Il faut enfin rechercher comment la masse est répartie dans le corps, quel est l'endroit où se trouve le centre de gravité du corps entier et du tronc en particulier, si les jambes, lorsqu'elles pendent, font des oscillations régulières, en vertu de leur pesanteur, et quelle est la durée de ces oscillations. Toutes ces mesures sont nécessaires pour procurer une base expérimentale sur laquelle on puisse établir l'étude de la marche et de la course. On ne trouve absolument rien qui s'y rapporte dans les auteurs dont nous avons cité les noms. Borelli seul a entrepris une mesure pour déterminer la situation du centre de gravité du corps entier dans l'extension. Il mit un cadavre sur le milieu d'une planche bien dressée, posa cette planche sur le bord d'un prisme, et la déplaça peu à peu jusqu'à ce qu'elle fût en équilibre. De cette manière, il trouva que le centre de gravité du cadavre tombait entre le siège et le pubis. Borelli considère aussi ce point comme celui de départ des forces qui agissent pendant la marche. »²³⁷

²³⁶ Barthez P.-J. *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*. Carcassonne : Imprimerie de Pierre Polere, 1798, p. 60.

²³⁷ Bischoff G.-T. et al. *Encyclopédie anatomique : comprenant l'anatomie descriptive, l'anatomie générale, l'anatomie pathologique, l'histoire du développement, et celle des races humaines*. (Traduit de l'allemand par A.-

Ce que l'on trouve d'intéressant chez tous ces auteurs présentés, n'est point le résultat immédiat de conclusions et d'expériences qu'ils aient faites sur les postures et les attitudes de l'homme marchant, courant, et sautant ou sur certaines positions caractéristiques des animaux en équilibre ou en mouvement, mais principalement l'expression des idées que chacun d'eux se fait de la manière dont la locomotion d'un être vivant doit s'accomplir.

Les progrès de la mécanique et surtout de l'anatomie montrent progressivement comment s'enchaînent le mouvement des segments et leurs contributions dans le déplacement entier du corps. La logique analytique se dégage dans la durée chronologique des descriptions et des considérations générales. Ce que l'on pensait parfois pure spéculation chez certains a changé la représentation que l'on avait d'une connaissance qui se trouvait erronée.

Conclusion (1)

Comme le note Auguste Comte dans ses Cours de philosophie positive : « *Ainsi, nous sommes certainement convaincus que la connaissance de l'histoire des sciences est de la plus haute importance. Je pense même qu'on ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire* », ²³⁸ mais « *A l'origine comme aujourd'hui, c'est l'étonnement et l'admiration qui conduisirent les hommes à la philosophie.* »²³⁹. L'histoire naturelle accoutume à rechercher les causes des effets qui concernent les phénomènes singuliers de la vie, exerçant ainsi la sagacité et la logique de l'intelligence dans la méthode.

Depuis le début des temps, les hommes mus par leur esprit critique et rationnel, se sont penchés sur le problème du mouvement humain et animal. Le comprendre pour

J.-L. Jourdan). Tome II. Traité d'Ostéologie et de syndesmologie de S.-T. Soemmerring suivi d'un *Traité de la mécanique des organes de la locomotion* de G. et E. Weber (p. 237-522) Paris : J.-B. Baillière, 1843, p. 493-494.

²³⁸ Cette affirmation est toujours présente dans les discours scientifiques actuels et semble se perpétuer avec d'autant plus de force que le patrimoine des connaissances s'accroît avec le temps. L'introduction au Colloque 2009 - 150 ans après l'origine des espèces : du darwinisme de Darwin à l'évolutionnisme contemporain par Armand de Ricqlès responsable de la chaire de biologie historique et évolutionnisme au Collège de France est patente : « *Je voudrai seulement dire ici, ma conviction que pour bien concevoir et bien enseigner l'état présent dans lequel se pose une question scientifique la prise en considération de son développement historique est d'une utilité majeure. De fait, envisager les débats au sein de l'évolutionnisme contemporain sans un solide tuteur historique serait se priver d'une source fondamentale de compréhension. C'est particulièrement vrai pour les étudiants pour qui il importe de remettre en perspective intelligible l'usage des techniques très sophistiquées actuellement nécessaire à la pratique de la recherche. Mais l'histoire des sciences a encore un autre atout elle favorise le développement d'une véritable culture scientifique dont l'utilité pour le citoyen va devenir fondamentale en tant qu'outil critique au fur et à mesure que les applications des connaissances scientifiques vont constituer des enjeux de société de plus en plus fondamentaux on le voit bien en ce moment même.* »

²³⁹ Aristote. *Métaphysique d'Aristote. Traduction en français avec des notes perpétuelles de Barthélemy Saint-Hilaire*. Tome 1, Paris : librairie Germer-Baillièrre et Cie, 1879, Chapitre 2, paragraphe 14.

Partie I. Conclusion

mieux le saisir fascine, car cette faculté donne l'impression de posséder du pouvoir sur le temps. Au V^e siècle av. J.-C., des artistes grecs ont reproduit sur des vases des styles de déplacements d'humains et d'animaux. Les écrits encyclopédiques d'Aristote ont éveillé et suscité l'attrait puissant des esprits curieux et des savants sur une discipline qui ne semblait pas avoir d'intérêt : l'Histoire Naturelle.

Avec le temps, la tendance générale des esprits tournés vers des idées plus positives a remplacé en secondant cette initiative pour reconnaître l'étude de la nature comme un élément indispensable à la formation intellectuelle et éducative de tout individu. Aristote a essayé d'établir selon une logique d'anatomie et de physiologie comparée, la nécessité de l'expérience, pour établir les connaissances humaines dans le lien entre l'observation de l'univers et le monde des êtres vivants ou entre les sciences naturelles et la biologie dans son traité *De motu animalium*.

Hippocrate et Galien avaient étudié le mouvement surtout à des fins thérapeutiques. Plus tard ce furent Léonard de Vinci, Ambroise Paré, Jérôme Mercurialis puis René Descartes, Herman Boerhaave, Nicolas Andry de Boisregard et Samuel Auguste Tissot et bien d'autres qui considèrent le mouvement soit sous un angle mécanique pur, soit sous un angle anatomique soit encore sous un angle médical et thérapeutique.

L'évolution des conceptions théoriques sur la progression humaine est un processus continu, mais marqué à certains moments par l'irruption de synthèses réalisées par des individus à des moments propices et opportuns, mais qui sont la conséquence de l'analyse des idées, des visions ou des travaux des prédécesseurs, faisant transparaître le concept de *révolution scientifique* comme une représentation de la réalité critique, voire obsolète. Ce concept de révolution scientifique fut évoqué par les travaux Alexandre Koyré lors du moment inaugural de la modernité mécanique et cosmogonique galiléenne lors de la période entre la fin du XVI^e siècle et le début du XVIII^e siècle. Cette notion sous-jacente de révolution est souvent utilisée en référence à certains penseurs pour jalonner et étalonner une périodisation, mais cela semble difficile de confiner l'histoire des théories de la locomotion animale et humaine indirectement celle de l'anatomie, de la mécanique et de la physiologie à un nombre réduit de « précurseurs », c'est quelque peu restreindre le champ de vision, car « [...] le choix que nous faisons de raconter l'histoire de ces personnes, de ces notions et de ces pratiques que nous estimons « fondatrices », où nous voyons l'origine de notre héritage commun, reflète toujours quelque intérêt du temps présent. Consacrer une histoire à Galilée, à Boyle, à Descartes et à Newton revient à faire un

Partie I. Conclusion

*choix révélateur de l'état de nos croyances scientifiques à la fin du XX^e siècle et des valeurs que nous leur attribuons. Si nous changions d'optique, nous pourrions retracer l'histoire de certains aspects du monde moderne jusqu'aux philosophes « vaincus » par Galilée, Boyle, Descartes et Newton, et à des conceptions de la nature et de la connaissance bien différentes de celles qui furent élaborées par les fondateurs officiels de la science. »*²⁴⁰ Cette notion de révolution semble peut-être la conséquence des difficiles perceptions des filiations du passé entre les événements, les conjonctures et les structures des sémantiques, des concepts, des théories et des techniques au sein d'une même science comme de l'interaction entre plusieurs qui conduit à l'acceptation des conceptions de Steven Shapin (1996) selon laquelle cette dernière n'existerait pas. En effet, selon son modèle de l'histoire les événements, les conjonctures et les structures historiques au sens de Geoffrey Barraclough²⁴¹ s'entremêlent en s'influençant dans la courte, moyenne et longue durée du modèle de Fernand Braudel²⁴² ce qui révèle et entraîne des difficultés de rationalité.

Dans cette perception complexe de l'histoire des sciences sous l'influence de savants de grandes renommées, qui semblent borner les périodes théoriques spécifiques aux courants de pensée dominants, certains scientifiques furent à l'origine de processus de découverte tandis que d'autres les poursuivant dans la même voie, les firent aboutir. Les choix cités, de certains acteurs considérés comme prédominants de par leurs conceptions théoriques et pratiques du mouvement se sont avérés délicats aussi bien sur les limites du champ de l'étude qui finalement n'existent peut-être pas que sur les tentatives possibles de périodisations qui changent, fluctuent selon les critères empruntés du « bornage », mais aussi en fonction de nos connaissances et appétences guidées au fil des lectures. Le 16 février 1870, à Paris, Charles Victor Daremberg médecin et bibliothécaire à l'Académie de Médecine terminait ses recherches, après un labeur pénible d'une vingtaine d'années à rédiger en deux tomes l'*Histoire des sciences médicales*²⁴³. Il dédiait son travail à son célèbre professeur Paul Émile Littré en lui empruntant un fragment de texte sur sa conception de l'histoire rédigée en 1829 : « *La science de la médecine, si elle ne veut pas être rabaissée au rang de métier, doit s'occuper de son histoire, et soigner les vieux monuments que les temps passés lui ont légués. Suivre le développement*

²⁴⁰ Koyré A. *Galilée et la révolution scientifique du XVII^e siècle*. [Introduction] Paris : Librairie du Palais de la découverte, 1955.

²⁴¹ Barraclough G. *Tendances actuelles de l'histoire*. Paris : Flammarion, 1980.

²⁴² Braudel F. *Écrits sur l'histoire*. Paris : Flammarion, 1991.

²⁴³ Daremberg C. *Histoire des sciences médicales*. [Tome 1, Depuis les temps historiques jusqu'à Harvey ; Tome 2, Depuis Harvey jusqu'au XIX^e siècle.] Paris : J. B. Baillière, 1870.

Partie I. Conclusion

de l'esprit humain dans le temps, c'est le rôle de l'historien. »²⁴⁴ Toujours en suivant cette fois-ci la pensée de Daremberg concernant l'histoire des sciences et en particulier celle de la médecine dans un petit *Essai sur la détermination et les caractères des périodes de l'histoire de la médecine* de 1850, il y explicite son but : « *C'est de montrer comment elles se sont formées, d'apprécier les idées qui ont présidé à leur développement et de se servir des idées, des faits antérieurs pour contrôler les idées et les faits modernes. En un mot, l'histoire doit servir à la constitution définitive de la science. L'histoire n'est d'ailleurs en quelque sorte que le principe d'hérédité en action ; c'est la conservation de la tradition* ». ²⁴⁵ Cette démarche appliquée à la connaissance du processus historique d'élaboration des théories de la locomotion peut faciliter la compréhension des prédominances d'idées, concepts, théories, et courants de pensée à certaines périodes de l'histoire, mais aussi pour ce travail, saisir l'émergence puis la constitution d'une science comme la biomécanique au XIX^e siècle dans un continuum historique. Enfin, percevoir son dépassement et envisager son absorption par d'autres courants scientifiques développés au profit de l'amélioration théorique avec le progrès technologique donne visibilité à des phénomènes aujourd'hui supposés, mais aussi parfois inconnus. On soupçonne à peine les conséquences des progrès des instruments d'optique permettant de voir des objets visibles à l'œil nu notamment les théories physiologiques du mouvement des fibres musculaires du XVII^e et XVIII^e siècle. Des théories sur la contraction de la fibre et du muscle lui-même qui feront naître parfois de véritables conflits et batailles théoriques propulsant la vérité. La biomécanique fortement liée aux progrès des instruments d'analyse a muté pour se transformer en un outil favorable au développement des mêmes disciplines qui l'ont fondée, l'anatomie, la physiologie, la mécanique. Des recherches historiques sur les théories de la locomotion n'ont peut-être apparemment pas autant de valeurs que celles qui sont effectuées sur une discipline fondamentale et noble comme la médecine, mais indirectement en constituent une ramification révélant les progrès sur la connaissance de la vie, par les facteurs apparents que sont les mouvements et les déplacements d'un lieu à un autre. Finalement, que représente la vie si ce n'est le mouvement des organes permettant le déplacement et dont le silence est synonyme d'immobilisme, « *notre nature est dans le mouvement ; le repos entier est la mort* »²⁴⁶.

²⁴⁴ Daremberg C. V. *Histoire des sciences médicales*. [Tome 1] Paris : J. B. Baillière, 1870, p. V.

²⁴⁵ Daremberg C. V. *Essai sur la détermination et les caractères des périodes de l'histoire de la médecine*. Paris : J. B. Baillière, 1850, p. 41.

²⁴⁶ Pascal B. *Œuvres complètes de Blaise Pascal*. [Tome 1] Paris : librairie de L. Hachette et Cie, 1858, p. 382.

Partie I. Conclusion

Cette première partie retrace autour des tentatives de compréhension de la marche, l'évocation des théories de l'âme et des esprits, comme source d'explication. Ces concepts aux définitions et aux rôles multiples, sont malgré tout récurrents et évolutifs depuis le courant hippocratique jusqu'aux études boréliennes de la locomotion. L'âme et les esprits sont les supports explicatifs permanents du mouvement et de la motricité malgré la constitution progressive d'une science physico-mathématique forte de sa rationalité appliquée à l'anatomie fonctionnelle puis à la physiologique.

La recherche de la compréhension de la progression chez les hommes et les animaux a suscité depuis l'Antiquité, la curiosité des philosophes. À l'instar d'Aristote, dépassant la simple attitude d'observation, ils en cherchaient l'explication dans les principes mécaniques de l'époque, qu'ils appliquaient aux connaissances anatomiques. Même si la validité de leurs interprétations a été réfutée, il n'en reste pas moins une volonté avérée de rapprocher l'anatomie et la mécanique, participant de ce fait progressivement à l'élaboration d'une discipline spécifique : la biomécanique. C'est d'ailleurs avec ce même esprit que se situait à la Renaissance G. Borelli. Informé des idées nouvelles de Galilée, il les a utilisées avec prudence, en souhaitant entreprendre son travail sur le déplacement des animaux et l'homme, de manière que cette partie de la physique centrée sur l'étude du mouvement, enrichie de démonstrations mathématiques, puisse être considérée comme une part de la science physico-mathématique.

Partie II. La iatromathématique
dans l'œuvre de Giovanni
Alfonso BORELLI :
mouvement quantifié

Introduction (2)

Le XVII^e siècle marque le développement de la pratique de l'observation et de l'expérimentation scientifique comme moyen de vérification des hypothèses avancées. La science aspire à s'évader des sphères privées des érudits maintenant trop étroites pour se diffuser au niveau national. Ainsi, deux institutions prestigieuses se constituent : la Royal Society en 1660, et l'Académie royale des sciences en 1666, pour se consacrer à la recherche scientifique et l'exporter comme garante de prospérité culturelle et politique nationale.

Cette activité intense multiplie les échanges dynamiques entre les académies dont le nombre s'accroît dans chaque pays. L'interprétation des traités théoriques scientifiques accompagnés de livres de vulgarisation aiguise l'esprit critique et le goût de l'application expérimentale pour découvrir et vérifier le fonctionnement des curiosités matérielles et techniques, mais aussi des organismes vivants. Cependant, les débats scientifiques sur la zoologie, ainsi que l'étude philosophique des relations entre l'animal et l'homme ne s'abordent que sur des plans marginaux, où le sensible quitte très lentement les esprits pour se changer en mécaniques mesurables et chiffrées.

L'animal « *qui a âme & sentiment, marche, ou rampe, ou nage, ou vole, doué de raison, ou dépourvu* »²⁴⁷, reste un « *corps animé, qui a du sentiment & du mouvement* »²⁴⁸. On le compare à l'homme pour mieux définir ce dernier par la nature de sa pensée, de sa raison, de son âme. L'homme pense sa supériorité par la compréhension du fonctionnement des éléments naturels dont l'animal fait partie. La pensée aristotélicienne maintenant latente, mais toujours utilisée pour argumenter les discours, maintient la différence entre l'homme et l'animal, ne serait-ce que par les représentations des âmes inférieures végétales et animales dont l'existence dépend des relations au corps, alors que seule l'âme intelligente arrive à subsister immortelle indépendamment du corps de l'homme. Malgré une âme élaborée supérieure à celle des végétaux, l'âme des animaux reste bien

²⁴⁷ Monet Philibert. *Invantaire des deus langues, françoise et latine : assorti des plus utiles curiositez de l'un et de l'autre idiome*. Lyon : C. Obert, 1636.

²⁴⁸ Animal, animale : 1) Animal, [anim]ale. adj. Qui appartient à l'âme sensitive. Vie animale. Les facultez animales. Les esprits vitaux & animaux. La partie animale. La partie raisonnable. 2) Animal, Dans le langage de l'Escriture sainte, signifie, Sensuel, charnel, il est opposé à spirituel. L'homme animal, ne comprend pas ce qui est de Dieu. 3) Animal. s. m. Corps animé, qui a du sentiment & du mouvement. Animal terrestre. Animal aquatique. Quand Dieu créa tous les animaux. Un livre de la nature des animaux. 4) Il se dit plus ordinairement d'une beste à quatre pieds vivant sur terre seulement, ou tantost sur terre, tantost dans l'eau. Petits animaux. Gros animaux. Animal à quatre pieds. Animal amphibie. 5) On appelle par mespris, Animal, Une personne stupide & sans esprit. Quoy cet homme-là? c'est un animal. ce n'est qu'un animal. un grand, un vray animal. hé le gros animal. celui qui vous a dit cela, est un animal. *Dictionnaire de L'Académie française*. 1^{er} Edition (1694, p.34

Partie II. Introduction

loin de celle de l'homme à qui seul revient l'activité d'abstraction. Ce qui présuppose qu'il doit être libre de toute matérialité.

De plus, le rapprochement du statut de l'animal de celui de l'homme pouvait représenter une remise en question des textes théologiques au travers de la matérialité de l'homme. Car de sentiments partagés, le scepticisme passe facilement à l'idée d'une condition partagée : « *Et pourquoi pas d'une même nature, d'une même destinée. Le statut de l'animal pèse de ce fait sur le statut de l'homme et sur ses croyances en une survie surnaturelle. À l'inverse, si on admet l'existence d'une âme matérielle chez l'animal, à trop se rapprocher de lui ne va-t-on pas ramener l'âme humaine à la matière ?* »²⁴⁹ Ce débat sur l'âme des bêtes franchit les frontières des siècles, en se heurtant au XVII^e siècle à l'ambiguïté de la définition de son statut par rapport à celui de l'homme. Les querelles gassendistes et cartésiennes sur le concept de l'âme humaine à la fois animale et matérielle, mais aussi spirituelle, alimentent les réflexions sur le fonctionnement mécanique de l'animal et de l'homme, autour de son réflexe automatique devant la douleur, de la compréhension de son déplacement, des principes physiologiques de la locomotion et de leurs localisations anatomiques.

Depuis l'Antiquité, notamment, on sait que le sang se déplace, mais en considérant son cheminement dans deux réseaux presque indépendants, jusqu'à l'hypothèse de William Harvey, qui place le cœur au centre du système unifié hydraulique vers 1618-1619. L'étude de la circulation impulsée par les mouvements du cœur, organe le plus important des animaux, représente l'exemple d'une démarche à suivre pour découvrir le fonctionnement mécanique et physiologique des autres parties du corps. Dans la doctrine de la circulation, Harvey exposait que le mouvement du sang se réalisait dans le système vasculaire de la même manière que dans une machine hydraulique, depuis laquelle on pouvait calculer avec exactitude la force motrice et la quantité de sang circulant. Cette démarche expérimentale et les méthodes de calcul quantitatif qui pouvaient s'appliquer à la circulation du sang, devaient aussi servir de modèle à d'autres études pour expliquer le fonctionnement du corps, son déplacement par exemple.

²⁴⁹ Lopez D. « L'animal du XVII^e siècle : fond de tableau théologique, mythologique, philosophique (quelques points d'ancrage) » [p. 11-26] In Mazouer C. *L'animal au XVII^e siècle*. Actes de la 1^{ère} Journée d'étude, 21 novembre 2001, du Centre de recherches sur le XVII^e siècle européen, 1600-1700. Université Michel de Montaigne-Bordeaux III. Journée d'étude publiée par Gunter Narr Verlag, 2003, p. 20.

Partie II. Introduction

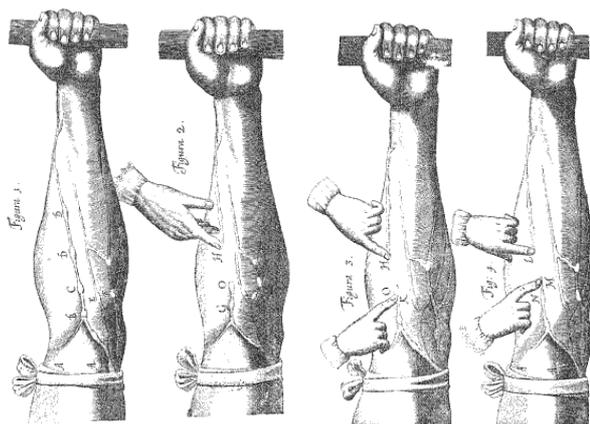


Figure 15. *La découverte de la circulation sanguine est d'autant plus belle chez Harvey que les procédés expérimentaux qui y conduisent sont simples presque évidents, naturels. (Extrait de Harvey William. Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus. Francofurti : sumptibus G. Fitzeri, 1628).*

Pour comprendre la rationalité du XVII^e siècle, l'étude des animaux occupe une place originale. Les hypothèses modifient progressivement l'évolution de l'anatomie et de la physiologie dans l'observation et l'expérience. Ce siècle voit se constituer l'anatomie descriptive et comparée pour mieux situer la connaissance de l'homme par rapport au monde animal.

La propagation de la philosophie de Descartes accentue l'union de la médecine avec les mathématiques. Les explications s'appuient sur les mouvements des atomes susceptibles d'être déterminés, calculés et géométrisés. En effet, la circulation de Harvey trouve l'appui de René Descartes, mais il l'utilise pour mieux l'adapter à sa théorie qui assimile le corps à une machine. Le battement cardiaque, système automatique, expulse vers le corps le sang, assurant l'automatisme de toutes les fonctions corporelles. La chaleur fait fermenter le sang qui dilate le cœur, et expulse le sang dans les artères.

Mais c'est en Italie que l'on a vu renaître les sciences naturelles. Les explications sont données par les lois mathématiques déduites de la mécanique expérimentale de Galilée. Le physicien astronome italien symbolise l'exemple à suivre pour toute une génération de savants. Il incite une majorité de savants italiens à se préoccuper de l'étude de l'astronomie, tout comme la démarche de Harvey de la physiologie.

Favorisée par Léopold, prince de Toscane, une société se réunit régulièrement sous le nom d'Académie del Cimento vers 1657. Autour de disciples de Galilée, ils cherchent à développer une certaine philosophie en appliquant la physique expérimentale à la nature : Benoît Castelli, François Rédi, Paul et Candide del Buono, Vincent Viviani, le Comte Laurent Magalotti, le Comte Charles Renaldini et Antoine

Partie II. Introduction

Uliva, mais aussi Borelli. C'est de ce terreau que la pensée iatromécanique tire ses racines. La réflexion quantitative se veut calculée rigoureusement depuis la circulation sanguine, la mécanique céleste de Galilée et l'explication des mouvements vitaux de Descartes. Elle s'efforce d'élucider des hypothèses physiologiques d'emboîtement de structures anatomiques microscopiques. C'est dans l'enceinte culturelle de l'académie, une atmosphère propice aux sciences, que Borelli établit l'union des mathématiques et de la physique expérimentale pour expliquer les phénomènes biologiques et notamment ceux de la locomotion animale, indirectement de l'homme.²⁵⁰

La publication post mortem, en 1680, du *De motu animalium*, ouvre une ère nouvelle de l'étude du mouvement. La physiologie se trouve mathématisée et prédite ; le mouvement qui transporte l'animal s'exécute par l'entremise des muscles et des os dont l'assemblage constitue les instruments analogues à ceux dont la mécanique se sert pour remuer, déplacer et mouvoir les corps. Ces deux appareils, squelettique et musculaire, combinés, assemblés et interagissant, produisent des mouvements locaux par l'entremise de leurs organes et de leurs membres pour effectuer la locomotion. Les muscles peuvent appliquer des forces motrices aux segments osseux. C'est ainsi que Borelli aborde son traité physico-mathématique, car il importe à l'anatomiste fonctionnaliste et physiologiste d'en connaître la distribution, l'arrangement, la structure, les propriétés et les forces musculaires pour expliquer le mouvement.

Les expériences et les observations minutieuses agrémentent le livre depuis une certaine idée de la constitution de la fibre musculaire et du mécanisme de la contraction, jusqu'à des tentatives d'imagination de scaphandres et de navires évoluant sous l'eau, dont les usages demeureront plus dans le domaine de l'hypothèse et du rêve que de la réalité pratique. Ces sauts de technologies et d'engins imaginaires se heurteront à juste titre à des critiques virulentes de savants intéressés par ces constructions.

²⁵⁰ Sprengel K., Jourdan A.-J.-Louis., Bosquillon E.-F.-M. *Histoire de la médecine : depuis son origine jusqu'au dix-neuvième siècle*. Paris : Deterville Th. Descoer, 1815.

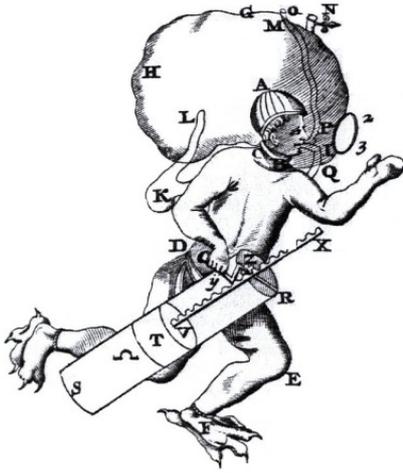


Figure 16. Des propositions CCXXI et CCXXII du *De motu animalium* Borelli présente une machine permettant à l'homme d'évoluer sous l'eau pendant plusieurs heures (Tab. XIV, Fig. 8).

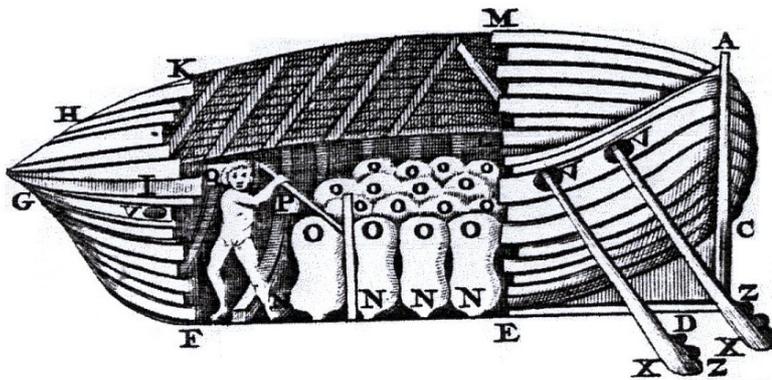


Figure 17. Dans la proposition CCXXIV du *De motu animalium* Borelli présente une construction pouvant évoluer sous l'eau (Tab. XIV, Fig. 9).

Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle



Figure 18. Lithographie de Giovanni Alfonso Borelli de 1829, réalisée par Pierre Roch Vigneron ; exposée à la galerie médicale de G. Engelmann (Paris 1825-1834) et faisant partie des collections de l'Académie nationale de médecine.

1) Une vie parsemée de turbulences

Les détails biographiques sur ses premières années manquent. Les documents révèlent qu'il montra de bonne heure un goût décidé pour la philosophie et les sciences physiques. S'il fallait en croire Giammaria Mazzucchelli²⁵¹ Borelli serait né à Naples le 28 mars 1608, ou peut-être le 28 janvier. Son père Miguel Alfonso de Varoscio était officier au service du roi d'Espagne Philippe III, dont le royaume des Deux-Siciles²⁵² lui appartenait à l'époque. Un autre historien Angelo Fabroni²⁵³, mieux informé, semble-t-il, stipule qu'il vit le jour à Castel Nuovo, place forte du royaume de Naples, où son père, un personnage plutôt obscur, était alors en garnison.

²⁵¹ Mazzucchelli G. *Gli scrittori d'Italia cioè notizie storiche, e critiche intorno alle vite, e agli scritti dei letterati italiani del conte Giammaria Mazzucchelli bresciano*. Brescia : presso a Giambatista Bossoni, 1753-1763. Vol. II, 3^e part., p. 1709-1714.

²⁵² Il occupe le sud de la péninsule italienne et l'île de Sicile. Sa capitale est Naples. Il a existé de 1816 à 1861, pour s'appeler auparavant le royaume de Naples.

²⁵³ Fabroni A. *Vitarum Italarum doctrina excellentium qui saeculo XVIII*. Tome II (Pisa, 1778), 222-324. Romae : Excudebat Komarek, apud Paulum Giunchi ..., in Typographio S. Michaelis ad Ripam, 1766-1780.

L'enfant reçut le nom de sa mère italienne Laura Borrello (ou Porrello), qui, d'après les biographes appartenait à une illustre famille espagnole : du nom de son père, Alonso, on composa le prénom d'Alphonse²⁵⁴. Cependant, rien n'est prouvé de cette noblesse maternelle.



Figure 19. Le Castel Nuovo, château fort du XIII^e siècle.

D'après une tradition dont un savant italien a retrouvé la trace à Castelnuovo, Alphonse Borelli, fils putatif d'Alonso serait en réalité l'enfant naturel du célèbre moine dominicain philosophe Tommaso Campanella. Il est à peu près certain, que Campanella fit en 1608, un séjour prolongé dans la citadelle de Castel Nuovo. D'autre part, l'éloge composé par Campanella à Paris, pour la naissance du Dauphin Louis de France, fut commenté et annoté par un certain Burelli, « Philippus Burelli auctoris nepos ». S'agissait-il d'Alphonse ? Toujours est-il qu'à l'époque où l'œuvre de Campanella était méconnue ou critiquée pour lui coûter des années de prison, Borelli parle de lui avec estime et respect. Il le cite à plusieurs reprises, s'appuie sur son autorité, en particulier dans son traité des *Fièvres*. Cette filiation secrète expliquerait certains traits communs que présente la physionomie du moine et celle du médecin, mais aussi une certaine passion de l'indépendance et une haine farouche de l'occupant espagnol. La relation jetterait quelque lumière sur le rôle politique de Borelli, demeuré mystérieux lors des rébellions du peuple soumis des années plus tard.

Nous connaissons très peu de choses des premières années de Borelli. Tout jeune, il fut amené à Naples et y manifesta pour l'étude, des dispositions qui étonnèrent ses maîtres, notamment Tommaso Campanella qui se chargea de son éducation à partir de 1625. Ses goûts le portaient de préférence vers les sciences physiques et la philosophie. À Rome, où il se rendit encore adolescent accompagné de son père, il y demeura de 1614 à 1635 où il eut pour maître l'abbé Benedetto Castelli l'un des premiers mathématiciens

²⁵⁴ D'après V. di Giovanni « Storia della Filosofia in Sicilia, v. II, p. 251 » Borelli aurait appartenu à une famille de Messine, même s'il n'était point né dans cette ville.

de l'époque, investi dans le domaine de l'étude de l'hydraulique. Lui-même se proclame son disciple et témoigne sa reconnaissance, dans son traité, *De motionibus naturalibus* (Proposition 232 : « [...] ut docuit Præceptor meus Benedictus Castellus [...] »). Dès cette époque, il conçut le dessein d'appliquer à la physiologie et à la médecine, la méthode géométrique dont René Descartes et Galilée avaient démontré l'efficacité. De plus Borelli a assisté à l'effervescence provoquée par la publication en 1632 du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée, une gloire qu'il souhaitait probablement en silence pour son œuvre.

La réputation brillante qu'il acquit bientôt dans les sciences physiques le fit appeler vers 1635 à occuper une chaire à l'Université de Messine, dans laquelle il se montra avec éclat. Le Sénat académique lui octroya les moyens de voyager et se mettre en contact avec les professeurs d'autres Universités. Avidé d'acquérir de nouvelles connaissances, le jeune Borelli se rendit en Toscane dans le dessein d'entendre Galilée ; mais il n'arriva que le 9 janvier 1642, pour assister aux funérailles de l'illustre philosophe, mort à Arcetri près de Florence.²⁵⁵

Borelli était de nature inquiète et de caractère difficile, ce qui lui attira des ennuis notamment pendant des phases de mécontentements, mais surtout lors de sa possible implication dans la rébellion sur les Espagnols à Messine, dont il dut s'enfuir. Il revint en Sicile, après avoir séjourné quelque temps dans la région,²⁵⁶ ce fut à peu près à cette époque qu'il fut agrégé à la noblesse de Messine, titre que les Messinois lui conférèrent comme une marque de la haute estime qu'ils avaient de ses talents. Borelli se trouvait à Messine, en 1648, pendant que les fièvres sévirent en Sicile avec une virulence inquiétante. Il étudia l'épidémie sur place et reconnut notamment qu'il fallait chercher l'origine ni dans l'influence des astres, ni dans l'abondance des pluies. L'air vicié était, d'après lui, la seule cause du mal (d'où le nom de malaria), il soigna ses malades au moyen d'inhalations de soufre, le traitement principal qu'il recommande dans son écrit *Delle cause delle febbri maligne*, publié à Pise, en 1649. En même temps, il observa les phénomènes relatifs à la digestion, mais aussi la formation et le rôle du chyle, livrant les résultats de ses travaux à l'Académie locale, celle de la « Fucina » de Messine.

²⁵⁵ Certains biographes pensent que Borelli aurait connu Galilée, mais cela reste à confirmer, étant donné les avis contraires.

²⁵⁶ Société De Gens De Lettres. *Biographie universelle, ancienne et moderne*. Paris : chez Michaud Frères, libraires, 1812, vol. 5, p. 172-173.

Partie II. Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle

La chaire de mathématique étant devenue vacante à l'Université de Pise à partir de 1655, le Grand-Duc de Toscane Ferdinand II de Médicis, l'offrit à Borelli, qui l'accepta avec l'agrément du Sénat pour professer une dizaine d'années de 1656 à 1667. Il s'embarqua pour Livourne en février 1656, pour en prendre possession jusqu'en 1667. Ses débuts furent plus pénibles à Pise qu'à Messine. Soit timidité naturelle, soit conscience de son infériorité littéraire en face des Toscans au style raffiné, il ne put terminer son discours d'inauguration. Cet échec, toutefois, ne l'empêcha pas d'obtenir la faveur de Ferdinand et de son frère, le cardinal Léopold prince de Toscane, mécène de la famille. Ferdinand fondateur de l'Académie d'Expérimentation des Médicis en 1642, élève de Galilée, puis de ses disciples Torricelli et Viviani, l'aida volontiers dans ses travaux anatomiques, lui fournissant les animaux dont il avait besoin. C'est d'ailleurs en 1657, que Borelli aménagea chez lui un laboratoire pour la réalisation d'expériences de physiologie animale. Léopold lui ouvrit les portes de l'Accademia del « Cimento » (Accademia dell'esperimento), dont les membres se réunissaient dans son propre palais. Fondée en 1657, elle complétait l'Accademia dei Lincei de Rome (1630), l'Accademia Platonica qu'il fonda en 1638, et l'Accademia degli Investiganti de Naples (1650). Cette société créée dans la ville de Florence avec des disciples de Galilée, cherchait à développer sa philosophie, cultiver la physique expérimentale, et à l'appliquer à la nature entière. Le témoignage de Vincenzo Viviani évoque notamment les projets du savant toscan envisageant la perspective de la rédaction d'une cinquième journée, à ajouter aux *Discours et démonstrations concernant deux sciences nouvelles* avec l'aide de Torricelli : « Dans la Cinquième journée on se proposait d'examiner et de résoudre différents problèmes et tout particulièrement ceux posés par Aristote, notamment dans le traité des vivants. »²⁵⁷

L'Accademia del Cimento remplit une fonction importante dans la promotion et la défense des nouveaux représentants de la communauté médicale. Elle contribua à fortifier les liens méthodologiques galiléens entre les médecins membres de l'académie. En effet, Galilée envisageait d'effectuer des recherches sur l'activité musculaire en se servant de la géométrie, idée suggérée à Nicolas Sténon et à Borelli.

Ce fut au sein de cette académie, première société savante scientifique à utiliser la méthode expérimentale galiléenne en Europe, que Borelli exposa ses premières tentatives faites pour unir les mathématiques et la physique à l'art de guérir, il initia

²⁵⁷ Viviani Vincenzo. *Vita di Galileo*. Bergamo : Moretti & Vitali, 1992.

ainsi les fondements de l'école iatromathématique. En ce lieu, Borelli connut les partenaires de Galilée : Vincenzo Viviani²⁵⁸, Evangelista Torricelli, Carlo Rinaldini, Antonio Oliva. Il devint l'ami de Carlo Dati, de l'érudit Antonio Magliabechi, et de tout ce que Florence comptait alors d'« illustri letterati ». Il eut cependant quelques démêlés avec Vincenzo Viviani, n'ayant pas su modérer son dépit quand celui-ci lui eut démontré, par des expériences concluantes, la fausseté de sa théorie sur les effets de la poudre à canon. Il imagina plusieurs instruments ou machines de physique, quand il travaillait à l'Académie del cimento, mais s'étant brouillé avec ce dernier qui était le principal moteur de cette entreprise, il cessa de s'en occuper. Ce ne fut pas sans envie qu'il assista aux succès de Marcello Malpighi, son élève, dont les découvertes anatomiques éclipsaient celles du maître. Le médecin et anatomiste de l'université de Pise Lorenzo Bellini, qui les connut tous deux, appelait Borelli « *Virum prodigiosum in demonstrationibus* » et Malpighi « *Virum prodigiosum in observationibus* ». ^{259,260}



Figure 20. Gravure de Gaetano Vascellini représentant une réunion imaginaire de l'Accademia del Cimento (Serie di ritratti d'uomini illustri toscani, 1973).²⁶¹

L'Académie, qui ne dura que dix ans, cessa d'exister lorsqu'en, 1667, Borelli abandonna brusquement Pise et la Toscane, froissé, paraît-il, à l'occasion d'un mauvais traitement qu'il avait reçu des gardes de la Grande Duchesse alors qu'il n'avait pas été invité à une fête de cour. Mais les difficultés que lui valait son caractère susceptible et opiniâtre ainsi qu'un tempérament déterminé et particulièrement dynamique l'avaient amené à désirer et à préparer ce départ. Il prit prétexte de sa santé et se retira à Messine en 1668. Un de ses plus chers disciples, le Vicomte Giacomo Ruffo de Francavilla, l'y attendait.

²⁵⁸ C'est en 1660 que Viviani et Giovanni Alfonso Borelli calculent la vitesse du son en mesurant la différence entre l'éclair et le son d'un canon. Ils obtiennent une valeur de 350 mètres par seconde, bien plus proche que les 478 m/s obtenus par Pierre Gassendi (la vitesse du son dans l'air à 0° C étant de 331,29 m/s).

²⁵⁹ Mazzucchelli, op. cit., p. 1710.

²⁶⁰ Malpighi généralisa ses découvertes microscopiques sur le monde animal en étudiant la constitution des plantes, faisant dire au physiologiste Pierre Flourens reprenant les propos de Bernard le Bovier de Fontenelle « *Marcel Malpighi, célèbre par tant de découvertes anatomiques, qui, quelques importantes qu'elles soient, lui feront encore moins d'honneur que l'heureuse idée qu'il a eue, le premier, d'étendre l'anatomie jusqu'aux plantes [...]* » In Flourens P. *Examen du livre de M. Darwin sur l'origine des espèces*. Paris : Garnier Frères, libraires-Editeurs, 1864, p. 131.

²⁶¹ Figure extraite de Shapin S. *La révolution scientifique*. Paris : Flammarion, 1998, p. 162.

Il lui donna en dehors des murs, tout près de la mer, une villa splendide ; et subvint royalement aux frais occasionnés par ses expériences scientifiques. Borelli²⁶² venait souvent à Naples, où dès 1669, il participait comme membre aux réunions de l'Académie dite *Accademia degli Investiganti* (1663-1670) sous la protection du marquis d'Arena et du philosophe probabiliste et évêque Juan Caramuel. Il fit connaître les thèses de son *De motionibus naturalibus a gravitate pendentibus*, avant de les publier en 1670, essayant de formuler une mécanique générale sur la base de la pesanteur et du vide. Après une période de travail intensif, pendant laquelle il étudiait treize heures par jour, il dut, pour reposer son esprit, accomplir un voyage. Alphonse visita la Sicile, monta au sommet de l'Etna où il fit des observations barométriques, qu'il se contenta de noter sans en vouloir donner d'explication. Il recueillit aussi les écrits, relatifs aux mathématiques, de l'abbé astronome Francesco Maurolico et d'autres moines siciliens. Enfin, il occupait ses loisirs en dictant à son disciple préféré, le poète, scientifique et érudit Alessandro Marchetti, des poésies, dont celui-ci corrigeait la forme souvent imparfaite.

La période la plus obscure de la vie de Borelli se situe vers 1672, Messine se trouvait divisée entre deux factions, celle des Merli et celle des Malvizzi. Le premier de ces deux noms, symbolisé par un oiseau noir, malin, qui ne cherche qu'à piller et le second au contraire signifiant un oiseau blanc au fond naturellement bon. C'est ainsi que le nom de Malvizzi correspondait aux noms des gens considérables unis au Sénat et le nom de Merli aux gens de la lie du peuple et quelques sommités mécontentes jointes au gouverneur oppresseur. Profitant du désordre qui régnait dans la cité, des dispositions belliqueuses de la jeunesse, de son ascendant sur elle, Borelli voulut, semble-t-il, délivrer son pays du joug de l'Espagne. Que fut cette conspiration et quel rôle y joua-t-il exactement ? C'est ce que les biographes crurent prudent de ne pas mettre en avant. Les Messinois, las du gouvernement espagnol, levèrent l'étendard de la révolte en 1674, et se donnèrent à la France, mais ce gouvernement les abandonna à leurs anciens maîtres au bout de quatre ans.

Borelli, accusé d'avoir secondé et appuyé la révolte par des discours séditieux, fut banni de tous les États soumis à l'Espagne. Exilé, il se retira à Rome, contraint d'accepter avec tous les honneurs la protection quelque peu tyrannique de la reine

²⁶² Galluzzi P. G. A. *Borelli dal Cimento agli Investiganti*. In Lomonaco, Fabrizio, Torrini, Maurizio. *Galileo e Napoli*. Congrès à Naples du 12-14 avril 1984. Naples : Guida, 1987 p. 339-355.

Christine de Suède²⁶³. Il écrivit, pour l'Académie qu'elle présidait, une dissertation ingénieuse et savante « *sur la construction des barques des Anciens à plusieurs rangs de rameurs* ». Mais il dut aussi, pour complaire à un royal caprice, composer une prétendue défense de l'Astrologie. Cette humiliation ne fut point la dernière et la pension promise par Christine ne put être longtemps servie. De plus, le cardinal Léopold Médicis, jadis son disciple et son ami, mourut à l'heure où le vieux savant eut le plus besoin de sa protection.

Abandonné de ses amis, volé par un domestique infidèle, lui ayant dérobé tout ce qu'il possédait, Borelli dut passer les deux dernières années de sa vie dans un asile obscur, d'une extrême indigence, chez les clercs réguliers des Écoles pieuses du Collège de San Pantaleone, occupé par les Pères des Écoles Pies, où il fit les fonctions de Maître enseignant les mathématiques à quelques novices.

Ni sa volonté énergique, ni son ardeur au travail ne se démentirent : il pratiquait les exercices religieux, enseignait aux jeunes élèves les éléments des mathématiques. Atteint d'une pleurésie, il mourut « *in somma povertà* », dit son biographe, le 31 décembre 1679²⁶⁴. On voit son tombeau dans l'église de S. Pantaléon, le proche couvent des Frères des Écoles Pieuses qui lui avait donné hospitalité durant les dernières années de sa vie.

2) Des travaux éclectiques de qualité

Les premiers travaux de Borelli eurent trait aux mathématiques. Dès 1658 étant professeur à Pise, il publia son *Euclides restitutus* ; il y réduisit à 24 les 178 propositions du géomètre grec, et « *dissipe les insuffisances des passages obscurs* » où certaines démonstrations étaient trop enveloppées. L'année même où parut cet ouvrage, il découvrit dans la bibliothèque du grand-duc, un manuscrit arabe dont il eut le loisir d'étudier. C'était une traduction des trois derniers livres des *Sections Coniques* du géomètre et astronome grec Apollonius de Perge ou Apollonios de Pergé, que l'on croyait perdue. Avec l'assentiment de Ferdinand, et malgré les protestations jalouses de Vincenzo Viviani, il emporta le manuscrit à Rome, et, durant l'été, s'occupa de le traduire en latin. Le Maronite qu'il employa à cet effet était aussi ignorant de la géométrie que Borelli de l'arabe. Pour vérifier les traductions, celui-ci devait refaire une

²⁶³ Breimer L., Sourander P. Alphonso Borelli and Christina. The father of kinesiology and the Queen of Sweden. *Clio medica*, 1965, p. 155-65.

²⁶⁴ Mazzucchelli. loc. cit.

Partie II. Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle

à une les démonstrations, recréer en quelque sorte l'œuvre entière d'Apollonius. Il y parvint, et continua son travail par le *Liber Assumptorum* d'Archimède, dont une version arabe se trouvait à la fin du même Codex. Le tout fut imprimé sous ce titre : « *Apollonii Pergæi Conicorum Libri V. VI et VII paraphraste Abalphato Aspahaensi, nunc primum editi. Additus in calce Archimedis Assumptorum liber. Ex codicibus arabicis mss. SS. Duc. Etruriae. Abrahamus Ecchellensis maronita latinus reddidit ; Joannes Alphonsus Borellus, in pisana universitate matheseios professor ; curam in geometricis versioni contulit et notas uberiores in universum opus adiecit. Florentiis, typis Jos. Cocchini 1661* ». Dans une seconde édition, publiée à Rome en, 1679, intitulée *Elementa conica Apollonii Pergæi et Archimedis opera, nova et breviori methodo demonstrata*, Borelli ajouta au texte des deux antiques géomètres une sorte de précis où lui-même avait donné à leur pensée une forme plus simple et plus nette.

Borelli profita de son séjour à Rome en 1658, pour rechercher avec un soin pieux les écrits du physicien et mathématicien italien Raffaello Magiotti²⁶⁵, un confident de Galilée, il ne parvint malheureusement qu'à recueillir qu'un petit nombre de Lettres. Il tenta aussi de compléter les expériences hydrauliques entreprises dans la ville éternelle par son Maître l'abbé Benedetto Castelli, mais le résultat de ses études ne vit le jour que bien plus tard²⁶⁶. De retour à Pise, il ne négligea point ce genre de problème, et collabora activement aux travaux sur l'hydraulique de l'ingénieur Famiano Michelini, jusqu'à la mort de celui-ci. Dans son traité *Della direzione dei fiumi* de 1664, qui traite du flux des rivières, des crues et des moyens techniques pour éviter les inondations, Michelini avait affirmé que la pression de l'eau ne s'exerçait pas identique sur le fond du lit des fleuves et sur les côtés.

Borelli s'acharna à défendre cette thèse, au point de lui sacrifier l'amitié d'un homme éminent, Michelangelo Ricci. Vers la même époque, en 1666, il critiquait, avec raison cette fois, les procédés alors en usage pour la fabrication du phosphore, et donnait à cette industrie renouvelée un essor inconnu jusque-là. En même temps qu'il étudiait les phénomènes de capillarité, il suivait attentivement les travaux de ses disciples, prenant une part considérable à la composition du traité que l'un d'eux, Alessandro Marchetti publia, en 1669, sur la force de résistance des corps solides²⁶⁷.

²⁶⁵ Les notes accumulées de Magiotti furent pillées lors de la grande peste qui sévit à Rome en 1656 et dont il en est mort.

²⁶⁶ Relazione sopra lo stagno di Pisa e supplemento da aggiungersi alla proposizione del libre II del padre Benedetto Castelli intorno alla misura delle acque correnti. Dans : Racolta d'Autori che trattano del moto dell'acqua. Firenze. Tartatti e Franchi, 1723.

²⁶⁷ De resistentia solidorum. Florentis : 1669.

Borelli continua à l'académie du Cimento ses recherches sur la pesanteur pour publier en 1670, un très important recueil d'expériences : le *De Motionibus Naturalibus a gravitate pendentibus* ²⁶⁸. En effet, Alphonse dans cette œuvre combat avec énergie les « sympathies » et les « antipathies » si chères aux admirateurs d'Aristote. Comme s'il entrevoyait déjà le principe de l'attraction universelle, il proclame l'existence d'une loi générale de la pesanteur, une « *force magnétique* » inhérente à chaque parcelle de la matière et qui pousse vers le centre de la terre tous les corps sans exception.²⁶⁹

Il n'y a pas, quoi qu'en dise Aristote, de « *légèreté positive* », la loi de la pesanteur est générale ; l'air même n'y échappe pas, entre son poids spécifique et celui de l'eau, le rapport est fixé par Borelli, d'après ses propres calculs à 1/1179. Non seulement tous les corps sont soumis à l'action de la pesanteur, mais dans le vide, ils tombent tous avec une vitesse égale. Borelli admet le vide, non qu'il en fasse une réalité concrète, il distingue les notions réelles des notions purement imaginaires, mais il le considère comme une privation. Les dimensions qu'il lui attribue sont fort bien représentées par ces quantités algébriques négatives, qui ne sont la mesure de rien, et qui, pourtant, s'additionnent ou se multiplient tout comme de vrais nombres.

C'est surtout au chapitre VII, où il émet sa théorie des fluides, que Borelli laisse libre cours à son imagination scientifique. Les phénomènes sont exactement rapportés, notamment la différence de volume de l'eau avant et après la congélation, déjà observée d'ailleurs par Galilée. Mais lorsqu'il s'agit d'indiquer en quoi consiste la fluidité, d'expliquer, par exemple, la diffusion du sel dans la masse liquide, il a recours à des hypothèses curieuses : il n'admet, ni l'agitation perpétuelle des molécules, inventée par Descartes, ni l'égalité parfaite de leur surface, destinée à faciliter le glissement. En fait, « *Borelli censure la conception cartésienne de la dureté et de la fluidité et propose sa théorie, typiquement galiléenne, selon laquelle les particules des fluides ne se meuvent pas, comme l'affirmait Descartes, de tous côtés, mais seulement vers le bas, entraînées par la force de gravité. La critique est développée longuement, mais elle reste limitée* ». ²⁷⁰

²⁶⁸ Editions de cet ouvrage : a) *De motionibus naturalibus a gravitate pendentibus*. Regio Julia. Ferri, 1670 ; b) id. Bononiae. 1970 (avec la : « *De vi percussionis* » et les Lettres au père Stefano degli Angeli). c) id. Bononiae 1672. d) *Atrium physico mathematicum* (c'est-à-dire Introduction au traité du mouvement des animaux). Bononiae 1686. e) *Tractatus duplex de vi percussionis et de motionibus naturalibus*.

²⁶⁹ Fabroni, op. cit., p. 279-280. - Voir aussi l'analyse du : « *de motionibus* », dans le « *Giornale dei Letterati* » 1671.

²⁷⁰ Mechoulan H. *Problématique et réception du Discours de la méthode et des Essais*. Paris : J. Vrin, 1988, p. 165.

Partie II. Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle

Il suppose les molécules, au contraire, munies d'aspérités, formant autour de chacune d'elles une sorte de duvet ténu et flexible. Ce sont comme autant de petits ressorts, que la moindre pression fait plier, mais qui aussitôt, en vertu de leur élasticité, reprennent leur position première. La chaleur a le don de les dilater ; le froid les resserre. À l'état normal, ces pointes font entre elles un angle de 60°. Borelli se flattait d'expliquer tous les phénomènes relatifs aux fluides, à l'aide de cette hypothèse, et y attachait un grand prix ; elle est du moins la marque d'un esprit ingénieux et d'une imagination originale.

Tout en évitant de parler de Descartes, il suit son raisonnement, dans le traité qui suit, et dont le titre est : *De vi percussiois*. Ce travail, terminé en 1667, ou même en 1665, montre quelles étaient dès lors ses préoccupations. Les problèmes de la mécanique l'attiraient. Il préparait de loin son œuvre capitale sur le *Mouvement des Animaux*. Le sujet du *De vi percussiois* est l'étude des lois dynamiques auxquelles obéit la percussion. Un hommage est rendu dans la préface aux premiers qui osèrent renverser les idoles péripatéticiennes : Galilée et Torricelli. Mais Galilée, dans son IV^e dialogue sur le mouvement des projectiles, une œuvre de jeunesse, se contenta d'indiquer la méthode à suivre, non la solution des problèmes ; il conclut en avouant, modestement que « *la question demeurait encore fort obscure* ». Ce qu'en écrivit plus tard Evangelista Torricelli se réduisait à de simples conjectures. Personne avant Borelli, n'avait affronté cette difficulté. Lui-même, quoi qu'en aient dit ses contemporains, ne déchiffre pas l'énigme ; mais il approche de la vérité, et surtout il triomphe d'opinions erronées. C'est ainsi qu'il combat la théorie qui attribuait la continuité du mouvement du projectile à la pression de l'air déplacé. La base sur laquelle il s'appuie est purement cartésienne. Pour lui comme pour Descartes, la cause du mouvement est une « *vertu interne* » qui se communique au corps heurté « *par expansion* ». Ayant ainsi posé les principes, il décrit et explique, dans une deuxième partie, les divers phénomènes relatifs à la transmission de l'énergie à travers les corps solides ou fluides. Les lois qu'il établit seront en partie confirmées par John Wallis, Christopher Wren et Christiaan Huygens. Il découvre même, avant Gottfried Wilhelm Leibniz, que les forces des projectiles doivent être évaluées en raison, non de leur vitesse, mais du carré de celle-ci (la proposition 117 est ainsi conçue).

Partie II. Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle

Le *De vi percussiois* parut à Bologne en 1667²⁷¹, à Leyde en 1681. Il ne tarda pas à attirer l'attention et les critiques des physiciens averroïstes de Padoue. Le père Stefano degli Angeli se chargea de résumer leurs griefs, Borelli lui répondit une fois²⁷², sans insister, bien que son contradicteur continuât à lancer contre lui un deuxième, un troisième et même un quatrième recueil de « Considérations ». Mais lorsque le père lyonnais Honorati Fabri eut mis quelques objections nouvelles, Borelli ne manqua point de les résoudre, dans un opuscule qui, en 1670, fut imprimé à la suite d'autres écrits²⁷³.

Ce furent surtout ses observations astronomiques, qui valurent à Borelli une réputation dans de nombreux pays. La colline de S. Miniato, dont la ligne harmonieuse borne au sud-est l'horizon florentin, était souvent le théâtre de ses travaux. Il confirma ainsi par ses propres observations la théorie de Saturne, telle que l'avait publiée Christiaan Huygens dans son *Systema Saturnium* de 1659 ; puis fit écrire à ce savant, par le duc Léopold de Médicis, une lettre des plus élogieuses et dont lui-même avait rédigé le texte. C'était en 1660. La même année, il adressait à l'Académie des Sciences de Paris, dont il était correspondant, la relation d'une éclipse de Lune. Plusieurs fois il eut l'occasion d'étudier ce genre de phénomènes, particulièrement à Rome, en 1674²⁷⁴.

Borelli observa la comète apparue en 1664, au mois de décembre. Il publia même à ce sujet, sous le pseudonyme de Pietro Maria Mutolo, un savant opuscule, qu'il eut soin de commenter lui-même dans une lettre au duc Léopold. Alfonso y soutient, contre Giovanni Domenico Cassini, que les comètes tournent, non autour de la terre, mais autour du soleil, tout comme les planètes. Il ajoute hardiment, malgré toutes les opinions des anciens et des modernes, que les comètes se meuvent suivant une courbe parabolique. Or les découvertes de l'astronome Johannes Hevelius, ne devaient paraître que trois ans plus tard.

Pendant vingt-sept ans, Galilée avait étudié les satellites de Jupiter, ces planètes auxquelles avait été donné le nom des Médicis. Devenu aveugle, il avait confié ses notes à son disciple le Père Raineri, dans l'espoir que son travail serait tôt ou tard achevé. Raineri le continua en effet, mais il mourut en 1648. Giovanni Battista Odierna

²⁷¹ *De vi percussiois Liber*. Bononiae, ex typis Jac. Montii, 1667.

²⁷² Risposta... alle considerazioni fatte sopra alcuni luoghi del suo libro della forza della percossa dal Stefano degli Angeli. Messina, 1668.

²⁷³ *Historia et Meteorologia incendii Aetnaei anni 1669. Responsio ad censuras R. P. Honorati Fabri contra librum De vi percussiois*. Reggio Calabria, Dominici Ferri, 1670.

²⁷⁴ Osservazione dell' eclisse lunare dell' 11 gennaio 1675. Voir Nazari, « Giornale dei Letterati di Roma », 1675, p. 34.

poursuivit, en Sicile, l'œuvre du Père Raineri, et Borelli celle d'Odierna. Il publiait, au fur et à mesure, les résultats de ses opérations et de ses calculs. Ce furent les *Ephemerides mediceorum planetarum*. Giovanni Domenico Cassini, pour établir certaines tables astronomiques qu'il publia en 1663, ne fit que compléter ces indications.

Durant l'été de 1665, Borelli s'était attelé à suivre le cheminement de ces astres, dont l'étude, entreprise par Galilée, était pour ses disciples comme un héritage sacré. Quelques mois plus tard, en 1666, il publiait, non plus des tables, mais une théorie complète des satellites de Jupiter : *Theoricæ Mediceorum planetarum ex causis physicis deducta*. Il entrevoit que la trajectoire elliptique des planètes est due à la combinaison d'une force centrifuge et d'une force centripète en considérant l'influence de l'attraction des satellites de Jupiter. Borelli s'intéresse à la théorie planétaire d'Ismaël Boulliau, qu'il emploie également pour expliquer les mouvements des lunes de Jupiter. Il suppose l'idée de la gravitation universelle. Dans cet ouvrage, il ne craint point d'élargir son sujet, et de tracer, suivant l'expression de l'abbé Antonio Schinella Conti, « *les grandes lignes d'une nouvelle physique céleste* ». Les satellites de Jupiter ont, dit-il, un double mouvement : l'un autour de Jupiter lui-même, comme la lune autour de la terre, l'autre autour du soleil, comme la terre, sans doute. Borelli n'ose le dire, mais le laisse suffisamment entendre. Or, comment des corps d'une densité énorme peuvent-ils ainsi demeurer en équilibre au sein de l'éther ? C'est ce qu'il tâchera d'expliquer et de faire comprendre à l'aide d'une expérience.

Soit un corps plongé dans un liquide. Agitons celui-ci de manière à lui imprimer un mouvement de rotation. Que d'autre part, au centre du liquide, se trouve un aimant capable d'attirer le corps. Ce corps se trouve soumis à une double influence : l'une l'éloigne du centre ; elle provient du mouvement de rotation dans lequel le corps est entraîné ; l'autre tend à l'en rapprocher : c'est la vertu magnétique de l'aimant. Si ces deux forces sont égales, elles se neutralisent, et le corps demeure en équilibre, c'est ce qui se produit pour les astres. Ceux-ci nagent dans l'éther, suivant la belle comparaison de Descartes, comme un navire sur l'océan, sollicité par deux forces qui s'équilibrent : l'une est la force « centrifuge, motocirculaire ou extrinsèque » ; l'autre, la force d'attraction ou « vertu magnétique », qui appartient d'après Borelli, aux rayons solaires.

Partie II. Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle

Il y a là, une première et très appréciable tendance vers des idées que Newton rendra lumineuses et fécondes^{275,276}.

Aucun événement pouvant intéresser la science ne passait inaperçu pour Borelli. En Sicile, il étudia de très près les éruptions volcaniques, puis, à la demande de Léopold de Toscane et de la Société royale de Londres, publia les résultats de ses observations²⁷⁷. Cependant, ses préférences ne cessaient d'aller à la médecine, science qui de tout temps avait été en grand honneur chez les Italiens du sud²⁷⁸. Elle était pour lui, moins un art dont l'exercice doit procurer les honneurs et la fortune, qu'une science digne d'un culte profond et désintéressé. Des 1619, il avait recherché, jeune encore, les causes des fièvres malignes qui décimaient ses compatriotes²⁷⁹. À Pise, il se livra à l'étude de l'anatomie et, par l'intermédiaire de Léopold, fit l'autopsie d'un nombre incalculable d'animaux, aidé dans ces travaux par des étudiants et des professeurs de l'université.²⁸⁰

Il s'occupa d'abord de la conformation et du rôle des reins²⁸¹, dans une parution associée intitulée *De structura renum observatio anatomica* de Bellini et *De Renum usu Judicium* de Borelli (1664). Ils montrent que la substance rénale se constitue par l'assemblage d'un grand nombre de canalicules dans lesquels l'urine s'écoule dans le bassin. En s'appuyant sur les recherches de Malpighi, ils révèlent que les capillaires artériels présents dans le cortex rénal transportent le sang et laissent ensuite échapper le liquide sanguin aqueux qui pénètre dans les canalicules rénaux, tandis que le sang qui reste poursuit son chemin dans les veinules rénales.

Borelli s'intéressa aux fonctions de l'œil et de la vision. Il avait observé, que l'œil gauche percevait les objets plus grands et plus distinctement. Il développa cette idée dans un opuscule resté inédit : *Osservazione intorno alle virtù ineguali degli occhi* (1669).²⁸² Enfin, les découvertes de Marcello Malpighi sur la structure du nerf optique,

²⁷⁵ Delambre J.-B. *Histoire de l'astronomie moderne*. [Tome Second]. Paris : Courcier, libraire pour les sciences, 1821, p. 32-34.

²⁷⁶ Giornale dei Letterati d'Italia, 26 mai 1668. In Montucla Jean-Étienne. *Histoire des Mathématiques*. Tome IV. Paris : A. Blanchard, 1968.

²⁷⁷ *Meteorologia incendia Aetnei*, 1669.

²⁷⁸ Dès le XIII^e siècle, Egide de Corbeil cite avec de grands éloges Pietro Musandino, de l'école de Salernes, médecin de Philippe-Auguste.

²⁷⁹ *Della causa delle febbri maligni*. Pisa, 1649.

²⁸⁰ Notamment « Charles Fracassario », professeur à Pise depuis 1663.

²⁸¹ *De renum usu judicium*. (Publié avec : *observatio anatomica de structura renum*, de Lorenzo Bellini. Argentorati, typis sim. Pauli, 1664, in 8°.

²⁸² C'est-à-dire Observations sur l'inégalité de la vue, eu égard aux deux yeux. On trouve cette dissertation dans le Giornale de' Letterati di Rome, 1669, p. 11 ; elle a été traduite en français, et insérée dans les mémoires de l'Académie des Sciences, tome X. Cet écrit a été traduit en français, & imprimé dans la quatrième conférence de Jean-Baptiste Denys de Sallo, du premier novembre 1672. Son article dans le supplément au Journal des Savants

lui parurent, du moins au début, dignes de ses éloges, et il lui adressa, pour l'encourager, une longue lettre. Lorsque l'anglais John Finch, docteur à Pise, contesta les observations de Malpighi concernant le nerf optique des poissons, Borelli prit nettement parti pour son disciple et le défendit avec énergie.

Tant de travaux, qui auraient suffi sans doute à la renommée, de bien d'autres, n'étaient cependant aux yeux de Borelli que des moyens d'occuper ses loisirs. Son œuvre capitale, celle qui résume sa vie entière, se révéla le traité du mouvement des animaux, *De motu animalium*²⁸³. Il ne fut pas achevé du vivant de Borelli malgré vingt-quatre ans d'un travail opiniâtre. La reine de Suède, Christine devait supporter les frais de l'impression, mais rien n'était encore fait lorsque Borelli mourut le 31 décembre, ne pouvant partir pour Paris où il avait demandé la protection de Louis XIV. Il légua comme unique héritage, au père Carolus Joannes et à quelques amis, ce livre où il avait mis toute sa vie. La première partie fut publiée en 1680, la seconde en 1681.

3) Production scientifique borellienne

Les sujets d'études de Borelli sont extrêmement variés. Ils portent, entre autres, sur l'analyse et l'interprétation mathématiques des Coniques d'Apollonius et les Éléments d'Euclide, les origines chimiques d'une épidémie de fièvre qui eut lieu en Sicile en 1646-1647, les problématiques physiologiques de la digestion des aliments, la structure du rein. Il a publié de nombreux traités savants, souvent avec des idées originales et durables, et contribué expérimentalement à de nombreuses avancées. Il s'intéressa notamment à : l'interprétation du déplacement des comètes, l'orbite des lunes de Jupiter, une éruption de l'Etna, mais aussi à l'examen microscopique des cellules de sang rouges et les stomates²⁸⁴ des feuilles de plantes par l'exemple.

de 1672 se centre sur cette observation d'Alphonse Borelli évoquant que l'œil gauche voit ordinairement les objets plus distinctement que le droit. (p. 165). Jean-Baptiste Denys (1643-1704) prétend « Qu'il a répété et vérifié l'expérience de Borelli, tant pour la multiplicité des images que pour la force inégale des yeux. Il y voyait plus distinctement, tant de loin que de près avec l'œil gauche qu'avec l'œil droit. Plusieurs de ses amis l'avaient assuré que la même chose leur arrivait » Relevé In Trouessart J. *Recherches sur quelques phénomènes de la vision, précédées d'un essai historique et critique des théories de la vision, depuis l'origine de la Science jusqu'à nos jours*. Brest : imprimerie d'Edouard Anner, 1854, p. 289-290.

²⁸³ *De motu Animalium*, Io. Alph. Borelli Napolitani opus posthumum, Romae. Bernabò (1680-81), 2 vol. in 4° avec 18 planches. Autres éditions : Genève 1685 (dans la Bibliothèque anatomique de Manget) Leyde, 1685 et 1711 (avec le discours de J. Bernoulli sur les mouvements des muscles et sur l'effervescence). La Haye 1743 (avec les mêmes discours de Bernoulli). Naples 1754.

²⁸⁴ Orifice minuscule présent dans l'épiderme des organes aériens des végétaux, sur la surface inférieure des feuilles le plus souvent. Il permet des échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant, assurant ainsi la régulation de la pression osmotique avec le milieu extérieur.

On peut diviser en deux parties générales toute la production bibliographique borélienne : les écrits médicaux et biologiques, et d'autres types de travaux d'aspects très variés. La simple relation chronologique de ses travaux et la fréquence de ses éditions sont un clair exposé des préoccupations de Borelli à chaque moment de sa carrière, dévoilant un profil et une attitude polyfacétique avec ses avatars.

1. Les écrits biologiques et médicaux

Il est surprenant, en principe, qu'une des premières publications de Borelli, professeur de mathématiques en Sicile, soit un texte médical. Mais ce n'est pas tout, la production de traités sur les thèmes médicaux ou biologiques représente la moitié de l'œuvre scientifique de Borelli :

¹. *Le cagioni delle febbri maligne di Sicilia*. Naples, 1647, 1648 ; Consenza, 1649 ; Pise, 1658. Borelli étudie les causes de la fièvre maligne apparue en Sicile en 1647. C'est l'œuvre la plus éditée de Borelli, après le *De motu animalium*.

². *De renum usu judicium*, incorporé au traité de Bellini *De structura renum*. Strasbourg, 1664.

³. *De vi percussiois liber*. Bologne, 1667.

⁴. *Osservazione intornò alle virtù ineguali degli occhi*. Ce travail est inséré dans *Giornali de Letterati*. Roma, 1669. Il fut traduit en français et incorporé au tome X des Mémoires de l'Académie des Sciences. Borelli défend dans ce travail, que l'œil gauche voit habituellement les objets plus grands et avec une meilleure clarté que le droit.

⁵. *De motionibus naturalibus à gravitate pendentibus liber*. Regio, 1670 ; Bologne, 1670 y 1672. Cette œuvre, avec *De vi percussiois*, sont une espèce d'introduction à son œuvre capitale. Elles furent réimprimées jointes en 1686, à Leyden, avec le titre : *Tractatus duplex, de vi percussiois, et de motionibus naturalibus a gravitate pendentibus ; ad intelligentiani operis de motu animalium opprime necessarius; cum ejusdem responsionibus ad Stephani de Angelis animadversiones in librum de vi percussiois. Editio prima Belgica, priori Italica multo correctior et auctior*.

⁶. *De motu animalium pars prima, in qua copiose discrepatur de motionibus conspicuis animalium, nempe de externarum partium et artuum flectionibus, extensionibus, et tandem de gressu, volatu, natatu, et ejus anexis*. Roma, 1680.

⁷. *De motu animalium pars altera in qua de causis motus musculorum, et motionibus internis atque humorum qui per vasa et viscera animalium sunt*. Rome, 1681.

Postérieurement, les éditeurs les imprimèrent jointes en deux parties : Leyden, 1685 y 1711; Naples, 1731 en deux vols. ; La Haya, 1743. Manget les incorpora à sa Bibliothèque anatomique dans le tome II.

⁸. *De structura nervi optici*, publié dans l'*Opera posthuma* de Malpighi. Amsterdam, 1698.

Les écrits non médicaux

L'intitulé de cette partie ne présuppose à aucun moment que Borelli ait maintenu une activité primordiale de biologiste et seulement à quelques occasions dédié son attention à des questions à caractère mathématique, physique ou astronomique. Les apports de son savoir mathématique furent importants. Cependant, la plupart des historiens des sciences semblent d'accord pour dire que l'œuvre transcendante de Borelli est constituée par ses études astronomiques. Bien que l'intérêt de notre auteur pour vérifier la validité de sa méthode à tous les niveaux du savoir, le conduisit à une série de travaux très variés. :

¹. *Discorso... nel quale si manifestano le falsità e gli errori contenuti nell'adifesa del problema geometrico risoluto del R. D. Pietro Emmanuele*. Messine, 1646.

². *Euclides restitutus, seu prisca geometricae elementa facili sucontexta*. Pise, 1658 ; Roma, 1679.

³. *Apollonii Pergaei conicorum, libri V, VI et VII. Paraphraste Abalphato asphahanensi nunc assumptorum liber, ex codicibus arabicis manuscripti Ser. D. Estrariae. Abrahamus Echellensis maronita latinus reddidit. Joannis Alphonsus Borellus in Pisano Academia Matheseos professor curam in geometricis versionibus contulit ; et notas posteriores in universum opus adjecit*. Florence, 1661 ; Ambers, 1665.

⁴. *Euclides rinnovato*. Bologne, 1663.

⁵. *Lettera del movimento della cometa oppersa il mese di decembre de 1664*. Pise, 1665. Cette lettre Borelli la publia sous le pseudonyme de Pier Maria Mutoli.

⁶. *Theoricae Mediceorum planetarum ex causis physicis deductae*. Florence, 1666. Authentique prologue à la loi de Newton pour appliquer l'action des forces centrifuges au système de Jupiter.

⁷. *Risposta... alle considerazioni fatte sopra alcuni luoghi del sui libre della forza della percossa del R. P. F. Stefano de gl'Angeli*. Messine, 1668.

⁸. *Metereologia Aetnae, sive historia et metereologia incendii Aetnaei, anno 1669*. Pisa, 1669. Réimprimé joint à *Accessit responsio ad censuras R. P. Honorati Fabri contra suum librum de vi percussionis*. Reggio, 1670.

⁹. *Osservazione dell'Eclissi Lunare fatta in Roma la sera dei 11 gennaio 1675*. Note insérée dans le journal Letterati. Rome, 1675.

¹⁰. *Elementa conica Apollonii Pergaei, et Archimedis opera, nova et breviori methodo demonstrata a Jo. Aph. Borelli*. Rome, 1679.

Partie II. Chapitre 1. Borelli : un personnage et une œuvre du XVII^e siècle

¹¹. *Discorso sopra la laguna di Venezia. Relazione sopra lo stagno di Pisa. Suplemento de aggiuntgersi alla proposizione seconda del seconde libro de P. Castelli ecc.* Raccolta d'autori che trattano del moto dell' acqua., IV, 15-63. Florence, 1765.

On devrait inclure ici deux des œuvres citées dans la partie antérieure : *De vi percussionis* et *De motionibus naturalibus*. Cela concerne deux petits travaux destinés chacun à comprendre les études mécaniques, mais l'intention de l'auteur et son utilisation postérieure nous obligent à les considérer fondamentales dans ses recherches biologiques. Les études sur la mécanique et le mouvement animal sont difficiles à séparer jusque dans le classement systématique de la production scientifique de Borelli.

Les différentes éditions du *De motu animalium*

La première édition fut réalisée sous les auspices de la reine Christine de Suède et sous la direction de Carolus Joannes un jésuite, préposé général des Ecoles Pieuses. La publication à Naples en 1734, était composée de deux volumes. Le premier comprend la "pars prima" ; le second, en plus de la "pars secunda", inclut la *Dissertationibus phisico-mechanicis de motu musculorum, et effervescentia, et fermentatione* de Joh. Bernoulli. L'unique différence avec les antérieures, consiste, dans l'inclusion de l'opuscule de Bernoulli comme complément aux études de Borelli, et la direction, dans ce cas encouru à la charge de Bernardini Gessari qui a dédié l'édition à Francisci Buonocore, protomédecin du Royaume de Naples.

1680-1681. *De motu animalium, Io. Alphonsi Borelli Neapolitani matheseos professoris opus posthumum.* Pars prima [-altera]. (Collaborateurs Pirroni Carlo Giovanni, Donia Francesco, Bernabo Angelo avec une préface du jésuite Carolus Joannes [Pirroni]). Italie, Rome Romae : ex typographie Angeli Bernabò, deux parties, 1680-1681.

1685. *Joh, Alphonsi Borelli, Neapolitani... de Motu Animalium.* (Préface de Carolus Joannes a Jesu (1640-1686). Pays-Bas, Leyde (Leiden), Edition Altera correctior & emendatior.) Imprimeurs Lugduni in Batavis : Apud Cornelis Boutesteyn, Danielem a Gaesbeeck, Johannem de Vivie & Petrum Van Der Aa. 1685.

1710. Joh. Alphonsi Borelli,... *De Motu animalium* (ex editione Caroli Joannis a Jesu), pars prima (-secunda). Editio novissima, ab innumeris mendis & erroribus repurgata. Additae sunt post finem partis secundae Johannis Bernoulli meditationes mathematicae de motu musculorum (Collaborateur Carolus Joannes a Jesu, Carolus Joannes Pirroni, en religion.) Pays-Bas, Lugduni Batavorum apud Petrum Vander Aa (1682-1730) bibliopolam, 1710.

1734. Viri celeberrimi Joh. Alphonsi Borelli Neapolitani matheseos professoris, De motu animalium : pars prima[-secunda]. Editio nova neapolitana, a plurimis mendis repurgata, ac dissertationibus physico-mechanicis de motu musculorum, et de effervescentia, et fermentatione, clarissimi viri Joh. Bernoulli matheseos professoris Basileensis, aucta, & ornata. Italie, Naples (Neapoli), typis Felicis Mosca : publica autoritate de aere Bernardini Gessari, 1734.

1743. De motu animalium. Editio nova, a plurimis mendis repurgata, ac dissertationibus physico-mechanicis De motu musculorum, et De effervescentia, et fermentatione ... Joh. Bernoulli ... Aucta, & ornata ... Bernoulli, Johann (1667-1748), Elinger, Nikolaus (1645-1711), Carolus Joannes a Jesu (1640-1686). Pays-Bas, La Haye, Haggae Comitum, apud Petrum Gosse, imprimeur, 1743.

Chapitre 2. Considérations générales sur le *De motu animalium*

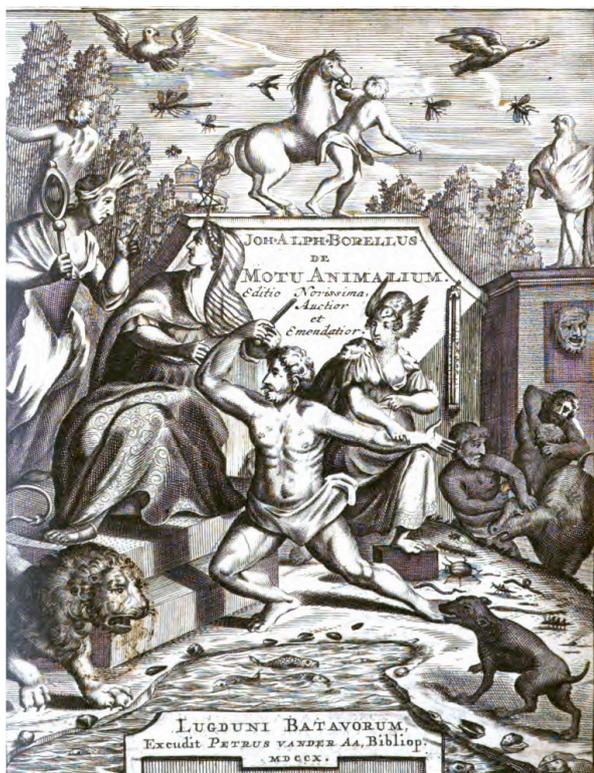


Figure 21. Frontispice du *De motu animalium* (1710).

À la fin du XVII^e siècle l'étude de la physiologie abordée selon une logique mécanique et mathématique par G. A. Borelli marque une étape dans l'histoire de cette discipline. L'application notamment des idées, des principes d'une méthode physico-mathématique ouvre d'autres perspectives, d'autres champs d'études qui seront à l'origine de découvertes fondamentales en physiologie, discipline qui se veut désormais rigoureuse, rationnelle, quantifiée et mathématisée.

Le *De Motu Animalium*, publié il y a plus de trois cents ans, reflète ce moment bien spécifique dans l'histoire de la physiologie. Ce traité de myologie et de mécanique fonctionnelle se positionne au carrefour où transitent les conceptions de la science antique vers l'investigation expérimentale des XVI^e et XVII^e siècles. L'exposé analytique des propositions et des figures correspondantes facilite la vision d'ensemble de l'œuvre et ses perspectives scientifiques.

Borelli utilise dans son argumentaire fondé sur une suite de propositions aussi bien les idées d'Aristote²⁸⁵ et de Galien²⁸⁶ que celles de son maître incontesté Galilée²⁸⁷. Sa conception mécaniste du corps des animaux et de l'homme laisse penser aux idées de René Descartes développées autour de l'homme-machine ; sa méthode est issue de l'école italienne des physiciens expérimentaux telle qu'on la concevait à l'Accademia del Cimento. Borelli cite deux fois Descartes pratiquement au final de son œuvre dans la deuxième partie lors du chapitre XXII sur les fièvres notamment dans la proposition CCXXI pour souligner que la fièvre n'est pas déclenchée par un feu ou une fermentation présente dans le cœur.

Le De motu animalium représente un témoignage sur une manière innovante d'aborder les problèmes scientifiques. Elle représente un compromis de méthode expérimental, d'utilisation de mesures et de modélisations physico-mathématique. En devancier, Borelli pratique l'expérimentation depuis l'observation directe et l'analyse quantitative des phénomènes par l'intermédiaire de nouveaux instruments d'investigation. L'œuvre évolue progressivement dans l'avancée de sa rédaction. Elle s'oppose, par le développement des relations mathématiques pour expliquer les curiosités physiologiques issues de l'observation aux idées dominantes de l'époque où l'âme et le principe vital étaient source d'explication de la logique fonctionnelle des organismes vivants.²⁸⁸ Mais, sur une conception toute cartésienne des esprits animaux et de leur rôle, Borelli construit des hypothèses, dont il a la sagesse de ne pas exagérer la valeur.

Le monde scientifique du XVII^e siècle doit à Borelli d'importants ouvrages de mathématiques, de physique et de médecine, mais le *De motu animalium* s'impose comme son œuvre capitale, à laquelle il dédia plusieurs décennies de travail et de soins. On peut comprendre l'évolution de ses conceptions théoriques sur les causes du

²⁸⁵ « Le moyen par lequel la faculté motrice de l'âme déplace les parties de l'animal, selon Aristote, fait référence aux esprits qui coulent du cœur par les artères aux extrémités des nerfs, jusqu'aux renforcements des membres. » Borelli, *De motu animalium*, chapitre I.

²⁸⁶ « Galien dit également qu'un tendon est comme un levier. Il pense que, par conséquent, une faible force de la faculté animale peut tirer et déplacer des charges lourdes. » Borelli, *De motu animalium*, proposition VIII.

²⁸⁷ « Galilée (sur le déplacement) a démontré que plus les masses des animaux étaient petites et plus petites étaient leurs tailles avec une diminution plus rapide de leurs tailles. La masse est proportionnelle au carré de la résistance et de la force des animaux. » Borelli, *De motu animalium*, proposition CLXXVII.

²⁸⁸ « Pour étudier les trajets, les organes et les mécanismes par lesquels la Nature effectue les mouvements externes nous ne devons pas négliger ce qui est évident : tout le monde convient que le principe, la cause efficace du mouvement des animaux est l'âme. Les animaux vivent par leur âme et continuent à se déplacer tant qu'ils vivent. Quand ils meurent, c'est-à-dire quand l'âme cesse de fonctionner, la machine animale reste inerte et immobile. » Borelli, *De motu animalium*, chapitre I.

déplacement des animaux, entre le début et la fin de l'œuvre ; en effet, plusieurs décennies sont passées, et les conceptions de l'auteur confrontées à la connaissance par la traduction des auteurs classiques ont évolué. Giovanni Alfonso Borelli est mort avant que son chef-d'œuvre de biophysique sur le mouvement animal n'ait été publié en 1680, sous les auspices de la reine Christine de Suède, il constitue un ensemble de plus de 520 pages et de 18 planches gravées annexées, contenant au total 218 figures support de 457 propositions.

Pour concevoir une idée générale du livre, il suffit de lire la préface du *De motu animalium*, où l'auteur explique la manière dont il envisage le déplacement des animaux. Il entreprend un travail difficile sur la physiologie du mouvement, dont les deux ouvrages qu'il avait publiés précédemment, l'un *Sur la force de percussion*, l'autre *Sur les mouvements naturels* dépendants de la gravitation, étaient les prolégomènes de celui *Du mouvement des animaux*. Dans ce dernier, il expose les causes et les modes qui rendent possibles les mouvements naturels. Il recherche les rapports et les proportions des facultés motrices, les lois mécaniques des mouvements de l'organisme, et l'art et les raisons qui ont présidé avec sagesse à la coordination naturelle de l'ensemble.

« J'aborde la difficile physiologie des mouvements chez les animaux. L'étude de ce sujet a été tentée par de nombreux auteurs antiques et par de plus récents. Néanmoins, à ma connaissance, personne n'a décrit ou même soupçonné les innombrables problèmes, remarquables et agréables à connaître qui y sont associés et peuvent être discutés. Personne n'a cherché jusqu'ici à résoudre les problèmes en utilisant des démonstrations basées sur la mécanique.

J'ai entrepris ce travail, afin que cette partie de la physique ornée et enrichie par les démonstrations mathématiques puisse être comptée au rang des parties physico-mathématiques comme c'est le cas pour l'Astronomie. Si ma tentative ne réussit pas complètement, au moins des hommes plus intelligents et plus instruits, sous mon impulsion, seront capables d'améliorer et compléter cette science par un raisonnement plus sûr et de meilleures méthodes. »

« Pour ce qui concerne l'œuvre et ses parties, une fois publiés les livres sur la force de percussion et sur les mouvements résultants de la pesanteur qui devaient venir d'abord, ils sont maintenant suivis par ce travail principal sur les mouvements des animaux. Ce travail décrit les causes et les modes qui révèlent les degrés et les proportions des puissances motrices, la mécanique des organes qui rendent les mouvements possibles, les procédés et les raisons pour lesquels ces mouvements ordinaires ont été ordonnés par la sagesse de la Nature.

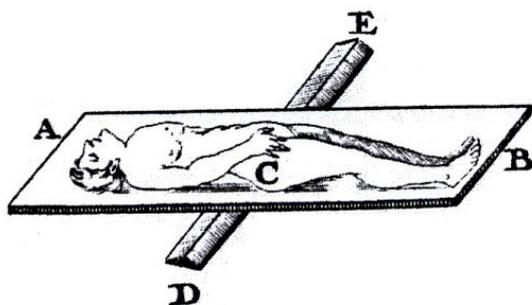
Le traité est divisé en deux parties. Dans la première, nous discuterons longuement les mouvements apparents des animaux, de leurs parties extérieures et de leurs membres, à savoir la flexion et l'extension, et finalement : la marche, le vol, la nage et d'autres attitudes associées. »

« Dans la deuxième partie, nous analyserons les causes des mouvements des muscles, ainsi que les mouvements internes, c'est-à-dire les mouvements des humeurs dans les vaisseaux et les viscères des animaux. Nous ne procéderons pas selon l'ordre des choses, mais selon les exigences d'une doctrine plus claire. Nous analyserons la structure des muscles et nous montrerons quelles forces et quels organes mécaniques déplacent les parties des animaux. Puis nous expliquerons comment les muscles travaillent, nous débattrons de la force motrice conduite par les nerfs aux muscles. Enfin, nous considérerons les mouvements internes qui ne dépendent pas de l'empire de la volonté, comme : les pulsations du cœur, la circulation du sang, la respiration, ses chemins d'action, ses organes et ses fonctions. Nous discuterons des esprits ou des sucres nerveux dirigeant le mouvement et la sensation, leurs implications dans la nutrition, leur mouvement, leur action sur le déplacement. Nous démontrerons la nécessité de se nourrir, la cause de la cuisson et la digestion des aliments, le filtrage du chyle, et comment la nutrition s'effectue ainsi que l'expulsion des excréments des pores, des glandes et des reins. Nous exposerons la circulation de la bile dans l'abdomen et celle de la semence génitale. Nous considérerons le sommeil et la veille. Enfin, nous discuterons les perturbations de quelques mouvements internes, les maladies, comme les convulsions, la fatigue et les fièvres. »

« En attendant, Lecteur érudit, sachez que j'utiliserai souvent les termes de volonté, d'empire et des termes semblables, en un sens large pour autant qu'on puisse selon la manière de parler habituelle accorder une volonté à des bêtes brutes, par une certaine analogie et ressemblance. »

1) La description des parties du livre

Ainsi le *De Motu Animalium* comporte deux parties. La première partie se divise en 23 chapitres et 224 propositions. L'ensemble accompagné de nombreuses scholies et corollaires, traite des mouvements des membres et des déplacements de l'homme et des animaux. Borelli y apparaît comme un novateur. Il soulève des problèmes dont certains ont stimulé la curiosité et les efforts de nombreuses générations de chercheurs. Certaines de ces solutions furent trouvées beaucoup plus tard. Par exemple, Borelli a expérimentalement déterminé la position du centre de gravité dans le corps humain. Mais c'est seulement en 1889, que Braune et Fischer ont amélioré cette étude, en utilisant des cadavres et des parties de cadavres congelés, équilibrés sur des tiges en acier dans différents plans.



« Proposition CXXXIV.

Le centre de gravité du corps humain, rectiligne, siège entre les fesses et le bassin. (Tab. X, Fig. 12)

Un homme dénudé est étendu rectiligne sur une planche horizontale AB, on place le milieu I de celle-ci sur le bord d'un appui prismatique ED. Le centre de gravité de la table AB se trouve sur la verticale de ce bord. La table est en équilibre quand le point C entre les fesses et le bassin du sujet se trouve sur la table juste au-dessus de l'arête de l'appui. Par

conséquent, le centre de gravité de l'homme gisant allongé se localise en C. »²⁸⁹

Figure 22. Protocole pour mesurer le centre de gravité. Figure 12 de la table X.

L'étude de la locomotion des animaux ne peut se réduire à la seule approche physiologique et mécanique, elle implique la convergence de disciplines variées depuis l'observation sur le terrain, l'analyse expérimentale des mouvements, l'investigation anatomique, l'élaboration de modèles de compréhension. Le *De motu animalium*, ouvrage puissant, représente un traité d'anatomie, de physiologie et de pathologie générale divisé par son propre auteur, en deux livres complémentaires, mais distincts de

contenu. Le premier contient 23 chapitres et 224 propositions, le tout dédié à ce que l'auteur appelle le mouvement externe ou visible de l'appareil squelettique humain, analyse aussi la marche et le saut chez les animaux quadrupèdes, le vol, la nage chez les poissons et d'autres phénomènes semblables. Il explique par les parties externes, les flexions et les extensions, les causes du mouvement externe comme résultant d'une complexe physiologie musculaire basée sur l'hypothèse chimico-mécanique.

Le second livre, spécifiquement médical qui contient 21 chapitres et 233 propositions, se consacre aux mouvements intérieurs et leurs causes (mouvements des humeurs dans les vaisseaux et dans les viscères des animaux, contraction des muscles, circulation sanguine, mouvement respiratoire, physiologie : digestive, rénale et nerveuse, etc.). Mais cette physiologie, dont les dogmes sont presque entièrement oubliés représente qu'une part très faible à la célébrité de ce livre. Alors que la partie consacrée aux mouvements internes n'a plus aujourd'hui, et en dépit des succès divers du courant iatromécanique tout au long du XVIII^e siècle, qu'un intérêt purement historique. Cette première partie demeure, pour qui s'intéresse à la locomotion animale, une lecture captivante.

La première partie, spécifiquement basée sur *Les mouvements externes des animaux et les forces impliquées*, commence par des remerciements élogieux, comme il est de coutume à cette époque, à sa bienfaitrice et tutélaire l'Auguste Reine Christine de Suède, en empruntant une citation de Lucrèce : « Vous, Madame, après avoir enrichi votre esprit et votre intelligence supérieure par l'étude assidue des trésors des sciences, vous comprenez que : La plus grande douceur est d'occuper les hauts lieux fortifiés par la pensée des sages, ces régions sereines d'où s'aperçoit au loin le reste des hommes, qui errent çà et là en cherchant au hasard le chemin de la vie. »²⁹⁰

Par l'intermédiaire de Carlo Giovanni (Carolus Joannes) principal des ecclésiastiques réguliers de Jésus, le cheminement de la pensée de l'auteur se trouve exposé avec louanges. L'introduction de l'œuvre situe très rapidement le caractère et le tempérament de l'auteur au travers d'un égocentrique sensible. Très rapidement Borelli explicite sa démarche, l'application de la méthode physico-mathématique à la physiologie. Tous les organes, toutes les fonctions de la vie animale chez Borelli sont soumises aux lois de la statique, de la mécanique et de l'hydraulique.

²⁹⁰ Lucrece. *De rerum natura. De la nature*. Traduction, introduction et notes Kany-Turpin José. Paris : Flammarion, Cop. 1997, I.2.

Il pose en principe que toute cause de mouvement se recherche dans la détermination d'une force, que cette force réside dans les propriétés des nerfs, et se manifeste par l'intermédiaire des muscles. C'est d'ailleurs par la description du muscle, de ses usages et de ses variétés qu'il aborde son traité. Borelli compare les muscles à des cordes qui mettent en jeu les os qu'il considère comme des leviers, le milieu physiologique de l'articulation constituant le point d'appui, la résistance est dans le bras du levier et proportionnelle à sa longueur, la puissance est dans les muscles contractés. La comparaison s'applique aux mouvements sollicités par plusieurs forces.

Borelli distingue dans les machines humaines et animales les trois genres de leviers, et se rend compte que, si dans quelques dispositions corrélatives des os et des muscles, il y a quelques fois des pertes de force, cependant, toujours, et partout, les dispositions sont combinées de manière à obtenir le maximum d'effet utile. L'auteur considère le mouvement comme uniforme, accéléré ou retardé, en notant sa vitesse, sa durée, sa quantité. Il décrit aussi toutes les formes du mouvement des os et de leur étendue, selon que le mouvement des articulations se révèle sphérique, circulaire, ou effectué selon une surface conique autour d'un centre imaginaire. Il recherche le centre de gravité et l'équilibre du corps dans diverses positions, dont il applique les principes trouvés à la locomotion, la marche des bipèdes, l'allure des quadrupèdes, au saut, etc.

« Proposition XII.

Quelle que soit son amplitude, aucune force, passant à travers le point d'application d'un levier c.-à-d. son point d'appui, peut équilibrer une masse, même faible, en agissant à l'extrémité du levier. (Tab. II, Fig. 5) »

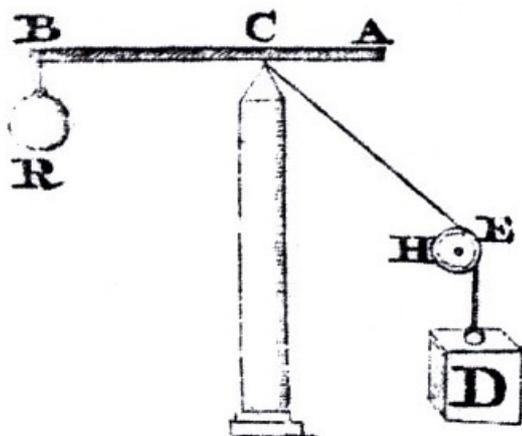


Figure 23. Figure 5 de la table II du *De motu animalium*.

Pour l'ensemble des vertébrés, le principe de la locomotion est unique : la contraction des fibres musculaires striées arrangées en un système coordonné de muscles provoque le déplacement des éléments du squelette les uns par rapport aux autres grâce à la flexion et à l'extension des articulations. C'est ainsi que Borelli aborde son traité par les fibres

musculaires²⁹¹. Ensuite, les effets de la contraction musculaire, c'est-à-dire les mouvements du squelette qu'elle provoque, y sont étudiés par l'application des lois physiques des machines simples : « *balance, levier, poulie, roue, coin, vis d'Archimède* ». L'idée fondamentale est l'application de la mécanique aux organes actifs et passifs de nos mouvements. Au moyen des lois des machines simples, il s'efforce de donner une expression physico-mathématique aux mouvements des principales articulations puis chaînes articulaires dans des mouvements multiples comme les marches bipèdes et quadrupèdes, le saut, mais aussi le vol et la nage, dont certaines propositions laissent entrevoir des sources d'expérimentations et des développements à venir en physique. Borelli a d'ailleurs le soin de nous donner, dans sa préface, la division et le plan de l'ouvrage. Il s'intéresse particulièrement à la contraction musculaire en appliquant à ses explications les principes de la géométrie euclidienne et de la méthode expérimentale d'inspiration galiléenne. De ce fait sa contribution à l'explication de la fonction musculaire se caractérise par l'originalité méthodologique et l'interprétation des données. La découverte de William Harvey sur la double circulation depuis l'interprétation quantitative des principes physiques de la mesure des flux du sang à l'entrée et à la sortie du cœur se révèle un exemple méthodologique physiologique à suivre, même si les travaux de Fabricius Acquapendente, Andrea Cesalpino, Realdo Colombo et Michel Servet préparaient la découverte.

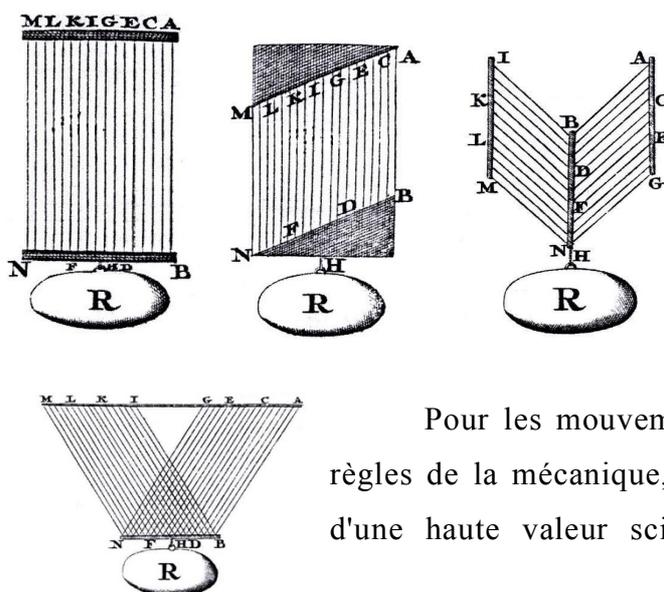


Figure 24. Différentes représentations géométriques des fibres musculaires chez Borelli.

Pour les mouvements musculaires, soumis en fait aux règles de la mécanique, la pensée de Borelli est originale et d'une haute valeur scientifique. On y trouve quantité de

²⁹¹ « Comme de coutume avec les autres sciences physico-mathématiques, nous essayerons d'expliquer la science du mouvement des animaux d'après des observations et des faits. Puisque les muscles sont les principaux organes du mouvement animal nous considérons en premier leur structure, leurs parties constitutives et leurs actions évidentes. » Borelli, DMA, chapitre 2.

propositions alors nouvelles, de remarques exactes, que les disciples n'eurent que le tort de généraliser outre mesure. Le corps de l'animal est pour Borelli une sorte de machine hydraulique. Les os sont les leviers, les muscles les ressorts, l'eau motrice est remplie par les esprits animaux, auxquels les nerfs servent de conduits, le cœur et le cerveau de réservoirs. De plus, l'influence des effets de la méthode galiléenne sur l'approche avec succès du principe d'inertie et de la loi de la chute des corps incite le disciple Borelli à prendre en compte dans l'étude du mouvement la position du centre de gravité et l'action musculaire indispensable au maintien des postures.

Sous le rapport purement scientifique, l'ouvrage est semé d'observations intéressantes. En mécanique, la longueur du levier, la distance du point d'appui ou du centre de mouvement auquel on appuie la puissance, influent sur l'énergie que celle-ci doit avoir. De même dans l'économie animale, la longueur du membre, la distance à laquelle s'insère le muscle, la puissance de l'extrémité du membre ou du centre de l'articulation, agissent sur le degré d'énergie nécessaire à la contraction du muscle pour l'exécution du mouvement.

On croyait alors que les muscles avaient été disposés par la nature de la manière la plus favorable relativement aux os qu'ils avaient pour but de mouvoir. Borelli démontre qu'il n'en est rien, de sorte que le moindre mouvement exige une dépense d'énergie beaucoup plus considérable que ne l'exigeraient les lois de la mécanique. Il est vrai que sur le terrain esthétique, la nature prend sa revanche, et que cette constitution, défectueuse en apparence, lui a permis de donner aux membres moins de volume et plus de grâce.

Les applications de la mécanique resteront légitimes, tant qu'elles ne sont pas poussées à l'excès. L'erreur commence avec la prétention d'évaluer en chiffres la force des muscles, de réduire en formules des mouvements très complexes, tels que ceux de la course, qui exigent l'emploi simultané d'un grand nombre de muscles. Les calculs se ressentent alors, et du peu de secours qu'offrait à l'auteur la mécanique de son temps, et de l'impossibilité de supputer des mouvements dont le premier mobile est inconnu dans son énergie. C'est ce qui enlève à la seconde partie de l'ouvrage toute valeur scientifique. Borelli entend soumettre au calcul tous les phénomènes de l'économie vivante : action du cœur, des poumons, du foie, etc. Ces prétentions, exagérées encore par certains disciples, donnèrent lieu à la formation d'une secte nouvelle, celle des « *iatromathématiciens* ». Mais Borelli, savant plutôt que praticien, ne saurait être rendu responsable des excès où tombèrent quelques-uns de ses partisans. Il eut raison, en

principe, de résoudre des inconnues physiologiques en empruntant des démarches mécaniques et des modèles géométriques pour « ramener sur leur terrain propre les médecins égarés ». Ce fut en quelque sorte le Galilée de la médecine.

Contemporains et biographes ne tarissent pas d'éloges sur le traité du *Mouvement des animaux* et la méthode qui présida à sa composition. Il y eut bien quelques critiques, dont les auteurs furent Giuseppe Gallarati de Novare et Guillaume Parent ; la réponse ne se fit pas attendre, écrite, non par Borelli, mais par un disciple zélé, Bernardino Zandrini déclare que son maître est vraiment « *il promulgatore delle leggi del moto e l'indagatore del movimento degli animali*²⁹² », et le *Giornale dei Letterati*, qui rapporte cette polémique, ne craint pas d'appeler Borelli « *uno dei genî più sublimi che abbiano in alcun tempo mai avuto le matematiche* »²⁹³. En France, on rendit justice à l'auteur du mouvement des animaux. Il semble même avoir soulevé, du côté cartésien, un certain enthousiasme, puisqu'à Montpellier, le chimiste Pierre de Chirac²⁹⁴ légua une somme de trente mille livres, destinée à fonder dans cette ville deux chaires, l'une d'anatomie comparée, l'autre de théories iatromathématiques. Cette dernière volonté du testateur ne fut pas remplie malgré ses prédilections pour les idées de Borelli.

Même au point de vue purement esthétique et littéraire, les louanges ne manquèrent point. Le cartésien Conti cite Borelli comme un exemple d'imagination originale et bien réglée. Le poète Campailla dans la préface de « L'Adamo », admire le style du « grand mathématicien » et du « grand philosophe. » Non, certes, que la langue soit un modèle de pureté et d'élégance. Borelli n'y songe guère, il s'occupe de la pensée, non des ornements qui peuvent la revêtir, mais de ce mépris de la forme, naissent des qualités toutes spontanées de brièveté, de facilité, de clarté surtout. Borelli écrit comme il pense, c'est-à-dire en savant et en cartésien.

Dans la première partie, l'auteur analyse également la course, le saut, le déplaçant sur la glace avec des patins, le vol des oiseaux, les déplacements des poissons et d'autres animaux dans l'eau. Il finit en décrivant une cloche de plongée, une combinaison de plongée, et un sous-marin.

La deuxième partie du *De Motu Animalium* est divisée en 22 chapitres et 233 propositions. Dans cette partie Borelli traite de physiologie et analyse le fonctionnement

²⁹² « Le promulgateur des lois du mouvement et l'instigateur du mouvement animalier ».

²⁹³ « L'un des génies les plus sublimes qui travailla pendant un certain temps sur les mathématiques »

²⁹⁴ L'éloge de Chirac par René Fontenelle, *In L'Histoire de l'Académie des sciences de Paris* : années 1732, p. 129.

des viscères considérés comme machines. Il étudie les mouvements internes que produisent les fonctions du cœur, de la respiration, etc. Cette physiologie, dont les principes, exclusivement puisés dans la mécanique, sont aujourd'hui presque entièrement oubliés. Elle n'a jamais eu qu'une très faible part à la célébrité de cet ouvrage. Le médecin botaniste hollandais Herman Boerhaave (1668-1738) dira à son sujet qu'un médecin n'agit qu'avec incertitude et obscurité, s'il n'est pas dirigé par les connaissances qu'on peut y puiser.

Certains auteurs à la fin du XVIII^e siècle témoignaient encore de la valeur scientifique au *De motu animalium*, comme ce témoignage de l'écrivain, critique littéraire de l'université de Milan Girolamo Tiraboschi repris par Giuseppe Antonio Landi : « *C'est un champ très-vaste que l'auteur a parcouru heureusement : les deux grands mobiles de la philosophie moderne, l'expérience & la raison, ont été ses guides, & il a tellement mêlé l'utile & l'agréable, que cet ouvrage est un des plus beaux qui aient paru dans le courant du dix-huitième siècle. Ce n'est pas que l'auteur ne se soit quelquefois trompé ; mais cela est rare, & peut-on ne point broncher dans une si grande quantité d'expériences, & sur une matière si vaste, si nouvelle, si compliquée ? En général, l'ouvrage est si profond, si original, si utile, que tous les philosophes modernes l'ont regardé avec admiration, & considéré comme un livre classique* »²⁹⁵

2) Une démarche méthodologique.

Borelli est un mécaniste dans ses conceptions des êtres vivants, mais aussi sa méthodologie d'analyse. Pour lui les opérations décrites s'effectuent par des déplacements de particules qui fonctionnent l'une ou l'autre par simple contact ou s'emboîtant l'une dans l'autre. Ces particules sont munies de formes appropriées. Elles sont absorbées par les orifices des canaux des organes et des tissus qui sont formés comme des particules appropriées et qui agissent en tant que passoires. Les réactions chimiques, appelées fermentations exigent des espaces et des stases énormes pour les substances fermentables.

Tout le travail de Borelli se fonde sur un axiome essentiel qu'il ne remet pas en cause : « *la Nature agit toujours en utilisant les moyens les plus simples et les plus économiques* ».²⁹⁶ Les différences qui sont observées sont dues aux nécessités mécaniques.

²⁹⁵ Landi A. *Histoire de la littérature d'Italie*, tirée de l'italien de M. Tiraboschi, et abrégée par Antoine Landi. Suisse, Berne : 1784, Tome 5, p. 128.

²⁹⁶ Cette considération sur la Nature est récurrente : Proposition VIII « *Et, si ceci est considéré comme vraiment stupide, comment est-il possible que la sage Nature, recherchant partout l'économie, la simplicité et la facilité, créer avec des machines animales une formidable industrie pour déplacer, non pas des charges lourdes avec une petite force mais, au contraire, des charges légères avec une force presque illimitée ?* » Proposition CLV « *Mais la Nature sage cherche la plus grande économie pendant la marche* ». Etc.

Réciproquement, quand la nature effectue une opération, il doit conclure que cette opération est la plus simple possible. Si elle est effectuée selon les lois de la mécanique, il s'avère impossible de faire autrement ou mieux. Telle était également l'opinion qui conduisait la démarche de Descartes. L'auteur s'efforce de comparer l'anatomie et la physiologie de l'homme, des animaux terrestres aussi bien aquatiques, que volant. De cette comparaison, il tire des conclusions générales.

Chapitre VII.

Les tendons des muscles ne doivent pas être attachés aux extrémités des os articulés, mais bien sur les tubérosités à proximité de l'articulation avec une direction oblique à l'axe longitudinal de l'os.

« Après ces prémisses, je note que la Nature dans tous ses travaux opère avec d'admirables sagesses et astuces et jamais sans raison. Personne ne pourrait avoir arrangé les tendons des muscles mieux qu'ils ne soient chez les animaux. Puisque les tendons ne sont jamais insérés dans les extrémités articulées des os, mais parfois sur les parties latérales des tubercules et plus fréquemment à proximité de l'articulation, cela valait la peine d'examiner pourquoi la Nature a été forcée d'utiliser un tel agencement des muscles et quels avantages considérables fournissent les énormes épiphyses développées aux extrémités des os. »²⁹⁷

Borelli développe son sujet par le raisonnement logique basé sur des exemples pris dans la vie quotidienne et sur des expériences dans le laboratoire. Le bon sens prévaut. Il écrit : *« si la saignée était réellement utile, des patients plus fébriles guériraient en France et en Espagne où ils sont tous soumis à la saignée par rapport à l'Italie et ailleurs où ils ne le sont pas. Si la saignée était réellement nocive, plus de patients devraient mourir en France et en Espagne »*. Puisque l'observation ne révèle aucune différence, il conclut que la saignée n'est ni très utile ni très nocive. Pour examiner si le cœur contient une flamme vitale, il ouvre le buste d'un cerf, incise un ventricule et place un doigt dans la cavité du cœur. Son doigt n'est pas brûlé. Mais il fait pression transversalement. Ceci nécessite des déductions sur la pulsation du cœur. Le positionnement d'un thermomètre au niveau du cœur lui prouve que sa température est de 40°C comme dans les autres viscères.

Borelli n'observe pas seulement, il mesure également. Il note l'augmentation du poids d'un muscle ou d'un groupe musculaire et calcule en relation la force exercée par ces muscles ou ce groupe musculaire. Il conçoit également des modèles géométriques.

²⁹⁷ in Chapter VII. *« The tendons of the muscles must not be attached to the extremities of the articulated bones but well on tuberosities in the vicinity of the joint with their direction oblique to the longitudinal axis of the bone. After these premises, I notice that Nature in all her works operates with admirable wisdom and cunning and never without reason. Nobody could have arranged the tendons of the muscles better than they are in animals. Since the tendons are never inserted in the extremities of the articulated bones but sometimes on lateral tubercles and more frequently in the vicinity of the joint, it was worth-while to examine why Nature was forced to use such an arrangement of the muscles and what considerable advantage huge epiphyses developed at the extremities of the bones provide. »* Extrait de Borelli Giovanni Alfonso. *On the Movement of Animals*. Traduction de Paul Maquet. Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1989, p. 24.

En utilisant un prototype, il calcule l'augmentation du volume de la poitrine dû à l'air inspiré. Il construit un spiromètre pour mesurer l'air expiré et l'air de réserve. Avec un modèle géométrique, il démontre que les muscles de la membrane intermédiaire sont impliqués dans l'inspiration seulement, tandis qu'ils ne peuvent pas provoquer l'expiration qui survient par l'élasticité.

Borelli, cependant, affirme qu'il n'y a aucune attraction dans la nature. Il prétend presque contre tout le monde qu'il trouve le concept d'attraction ridicule, mais c'était quelques années avant Newton. Alexandre Koyré note à ce sujet « *L'hostilité de Borelli contre la notion d'attraction est si grande qu'il préfère dire : l'aimant s'approche du fer, et non : l'aimant attire le fer.* »²⁹⁸. La vérification des calculs de Borelli ne donne pas toujours ses résultats, mais il convient de relativiser ses erreurs par rapport aux idées et hypothèses développées qui constitueront des avancées notables. Borelli applique la géométrie euclidienne et la physique mécanique à ses observations du mouvement musculaire, les principes des leviers et l'identification du centre de gravité d'une personne. Son analyse semble préfigurer les descriptions newtoniennes de la nature de la force ou réversiblement de la force de la nature. Il a correctement conjecturé la base physiologique de la fonction du poumon, décrit la contraction du cœur résultant de la stimulation électrique et postulé que le mouvement du muscle provenait de réactions cellulaires chimiques.

Vers le milieu du XVII^e siècle, quand les travaux de Galilée eurent fait mieux connaître les lois de la mécanique, on sentit davantage l'importance de leurs actions sur l'économie animale, et l'on fut naturellement poussé à se l'exagérer encore. On espéra porter dans la médecine l'exactitude que ce philosophe venait d'introduire dans la physique, on tenta d'appliquer ce calcul aux phénomènes de la vie. L'école des iatromathématiciens s'établit, brilla d'un grand éclat, et s'éteignit presque aussitôt après la mort de ses fondateurs.

Des ouvrages ont marqué la naissance du mouvement iatromécanique notamment avec la parution à Leyde de deux ouvrages fondamentaux, l'un en 1637, le *Discours de la méthode* de René Descartes, qui anticipa l'énonciation biomécanique de l'ouvrage posthume *L'homme* (1662) ; l'autre en 1638 les *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences se rapportant à la mécanique et au mouvement local* de Galileo Galilei, qui initièrent des perspectives iatromécanique en

²⁹⁸ Koyré A. *La révolution astronomique : Copernic, Kepler, Borelli*. Paris : Hermann, 1961, p. 513.

Italie. En effet, les deux sciences nouvelles sont la mécanique et les mouvements locaux, c'est-à-dire dans le langage récent, la statique et la dynamique. Abordant d'une façon magistrale quelques importants problèmes de biophysiques, notamment celui de l'ouïe, Galilée indiqua à ses disciples les résultats qu'ils pouvaient obtenir en appliquant sa mécanique au monde organique. Comme sous l'influence de ses observations de la pratique des artisans dans les ateliers de l'arsenal de Venise, il formule aussi un certain nombre de lois sur la résistance des matériaux, notamment des os.

Aborder les problèmes physiologiques par les théories physico-mathématiques, fut la tâche principale à laquelle Giovanni Alfonso Borelli consacra les dernières décennies de sa vie, en élaborant le *De motu animalium* (Rome 1680 et 1681). Les grandes fonctions dont l'ensemble constitue la vie, consistent en des mouvements corpusculaires qui se déroulent à l'intérieur de notre organisme. C'est ainsi que se développe une physiologie atomistico-mécanique fondée sur le mouvement, sur les particules et sur les pores. Le mélange et la séparation des particules constituent les points cruciaux de cette physiologie.

Giovanni Alfonso Borelli a vraisemblablement fait connaissance avec le cartésianisme vers 1658. Une de ses premières œuvres, *Les causes des fièvres malignes en Sicile*, publiée en 1649, est encore un exemple de l'influence cartésienne alors que dans ses œuvres ultérieures, il exerce une vigoureuse critique de plusieurs propositions cartésiennes. Il prouve dans des expériences de vivisection que le cœur est à la même température que le reste du corps de l'animal, réfutant ainsi la théorie de Descartes qui considérait le cœur comme une bouilloire distribuant sa chaleur au reste du corps. Son élève Malpighi poursuivra ses conceptions sur l'anatomie microscopique.

La démarche borélienne peut-être simplement exprimée par la devise italienne « *Provando e riprovando* »²⁹⁹ qui engage les membres de l'Accademia del Cimento³⁰⁰ à user des méthodes expérimentales en philosophie naturelle. Cette devise est notamment immortalisée en 1773, sur une peinture de Gaetano Vascellini, qui reconstitue de façon imaginaire une réunion de cette assemblée, établie à Florence après la mort de Galilée en 1642, par ses disciples les physiciens et mathématiciens Vincenzo Viviani et Evangelista Torricelli et leurs associés. Elle avait pour protecteurs deux membres

²⁹⁹ « Essayer et réessayer »

³⁰⁰ Académie de l'Expérience

influents de la famille toscane des Médicis alors au pouvoir, le grand-duc Ferdinand II et Léopold, tous deux expérimentateurs amateurs.

La méthode expérimentale de Borelli procède essentiellement de celle de Galilée, que le contemporain de celui-ci, Santorio Santorio, avait déjà appliquée en médecine. Mais cette référence prestigieuse ne doit pas faire oublier que pendant dix années Borelli a participé aux travaux de l'Accademia del Cimento, fondée par le Grand duc de Toscane Ferdinand II et menée sous la férule de son frère Léopold, lui-même élève de Galilée, à la dure école de l'épreuve expérimentale. La démarche de Borelli pour donner une expression mathématique aux mouvements externes du corps repose surtout sur l'application des principes dynamiques des machines simples à chacune des articulations du corps ou d'une manière plus élaborée, à toute une chaîne articulaire (Tab. XI, figures 4, 6 et 7).

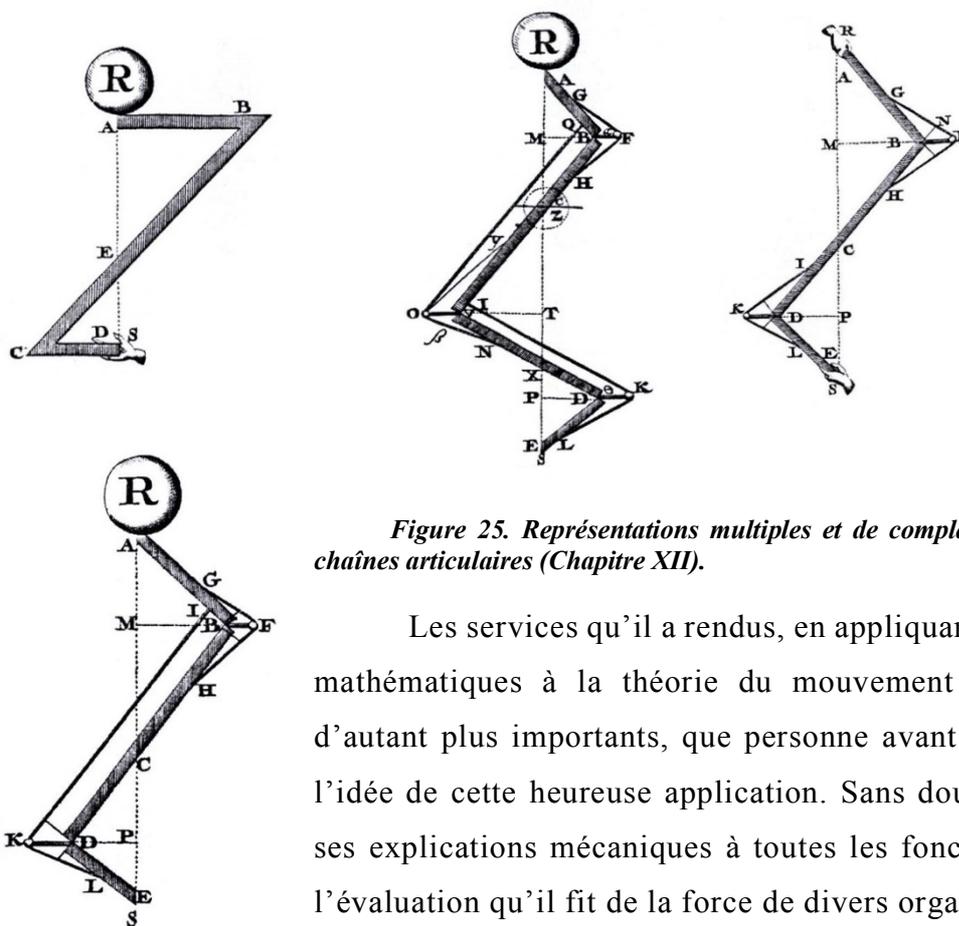


Figure 25. Représentations multiples et de complexités progressives des chaînes articulaires (Chapitre XII).

Les services qu'il a rendus, en appliquant la statique et les mathématiques à la théorie du mouvement musculaire, sont d'autant plus importants, que personne avant lui n'avait conçu l'idée de cette heureuse application. Sans doute, il étendit trop ses explications mécaniques à toutes les fonctions du corps, et l'évaluation qu'il fit de la force de divers organes repose sur des suppositions entièrement arbitraires, mais ses idées contribuèrent à rectifier des opinions plus hasardeuses, et à détruire des théories non moins gratuites et bien plus erronées. Il eut le premier la pensée de soumettre le mouvement du sang aux lois de la statique et de l'hydraulique, et de le calculer sans avoir égard à la force vitale ; il refusa de croire à

l'existence, généralement adoptée jusqu'alors, de fibres dans le sang pendant la vie. Borelli est aussi le premier qui ait donné une explication satisfaisante du mécanisme de la respiration.

Borelli expérimentalement détermine aussi de manière originale et simplement la position du centre de gravité dans le corps humain. C'est seulement en 1889, que Wilhelm Braune et Otto Fischer améliorent cette localisation en utilisant des cadavres et des parties de cadavres congelés qu'ils équilibrent sur des tiges en acier selon différents plans. Leurs protocoles expérimentaux de la marche sont restés pratiquement identiques pour construire des modèles depuis les calculs de masses, de volumes et de centres de masses segmentaires. Borelli a considéré la locomotion de l'homme et d'autres animaux dans différentes postures et conditions, qu'il restreint à l'application du calcul, jusqu'aux mouvements musculaires, qui se prêtent aux règles de la mécanique.

Dans la première partie, l'auteur analyse également la course, le saut, le déplacement sur la glace avec des patins, le vol des oiseaux, les déplacements des poissons et d'autres animaux dans l'eau. Il finit en décrivant une cloche de plongée, une combinaison de plongée, et un sous-marin.

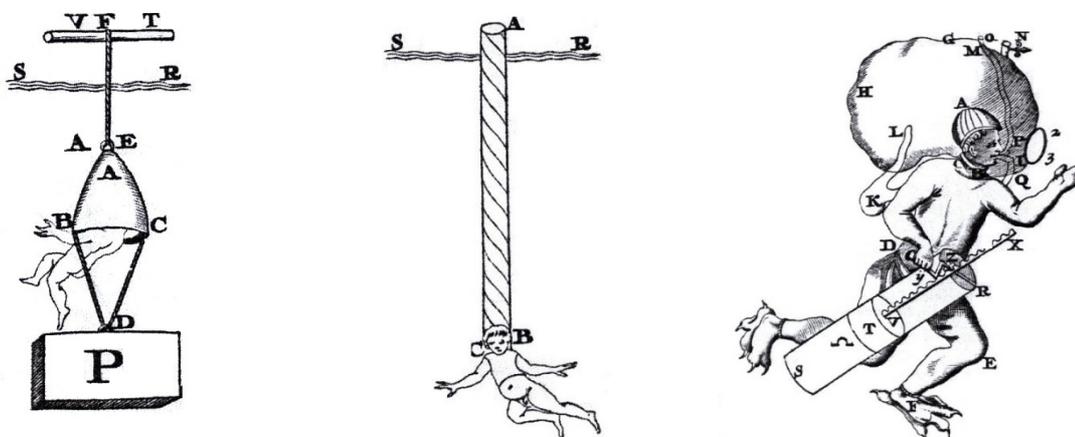


Figure 26. Procédés permettant à l'homme de rester sous l'eau.

3) Un fonctionnement expérimental

Inspiré à la fois du mécanisme théorique de René Descartes et de la physique expérimentale de Galilée, Borelli est surtout connu comme le fondateur du courant iatomécanique, école qui défendait une conception mécaniste globale de l'être vivant et de ses activités. Les succès des physiciens qui, comme Galilée, Torricelli et leurs disciples, avaient su donner une expression mathématique à des phénomènes physiques, lui indiquent le chemin à suivre. Borelli surtout mathématicien, auteur principalement

de nombreux travaux sur la mécanique céleste, essaye d'analyser selon les mêmes procédés³⁰¹ tous les mouvements, internes et externes, qui se produisent dans le corps de l'animal, en s'inspirant de la méthode expérimentale développée à l'Accademia del Cimento (*Académie de l'expérimentation*), dont il fut membre pendant les dix années qu'elle dura. Une méthode que Santorio Santorio³⁰² avait déjà introduite en médecine, avec l'utilisation de la balance, du thermomètre et d'autres instruments de mesure pour apprécier l'évolution de certains paramètres physiologiques.

Il est évident que l'approche mécaniste des phénomènes vitaux s'enracine bien avant le XVII^e siècle, entre autres dans l'œuvre de Léonard de Vinci qui disséqua un très grand nombre de cadavres, humain et animal, avec l'œil de l'ingénieur, créateur des machines volantes, autant que de celui de l'anatomiste, attaché à étudier les mouvements de l'Homme³⁰³. Le procédé de la découverte du mouvement de la circulation sanguine et les calculs sous-jacents de William Harvey se présentent aussi comme des exemples à perpétuer dans la conciliation de la théorie et de l'expérimentation.

La méthode de Borelli s'écarte du courant de pensée cartésien ; de cette tendance mécaniste qui progresse très souvent sans s'embarasser à confronter ses vues aux données d'une quelconque expérimentation. Dans le traité *L'homme* de 1664, Descartes imagine le corps humain comme une machine très semblable à un automate hydraulique, animé par l'écoulement des *esprits animaux* dans les *petits tuyaux* que constituent les nerfs. Outre l'aspect purement théorique du mécanisme cartésien, on remarque, que ce traité, particulièrement consacré à la physiologie nerveuse, se désintéresse des problèmes de locomotion. Descartes ne considère, dans la contraction musculaire, que les causes et non les effets. On relève une principale allusion à cette idée de locomotion dans cet extrait : « Ainsi, pour entendre comment une seule action, sans se changer, peut mouvoir maintenant un pied de cette machine, maintenant l'autre, selon qu'il est requis pour faire qu'elle marche : il suffit de penser que les esprits passent par un seul pore, dont l'extrémité est autrement disposée et les conduit en d'autres nerfs quand c'est le pied gauche qui est le plus avancé, que quand c'est le droit »³⁰⁴.

³⁰¹ *De Motu Animalium*, dédicace à la reine Christine.

³⁰² Santorio Santorio. *De statica medicina et de responsione ad Staticomasticem ars : aphorismorum sectionibus-octo comprehensa*. Lugduni : Sumptibus Antonii Cellier, 1690.

³⁰³ « Fais en sorte que le livre des éléments de mécanique, avec les exemples qu'il contient, précède la démonstration du mouvement et de la force de l'homme et des autres animaux, et ainsi tu pourras fournir la preuve de toutes tes propositions. » *Les Carnets de Léonard de Vinci*, feuillets A 10 r, trad. L. Servicen, tome 1, Paris : Gallimard, 1942, p. 95.

³⁰⁴ Descartes R. *L'homme*. [ed. F. Alquié, 1664]. Garnier, Paris 1963, tome 1, p. 473.

Borelli se distingue du mécanisme cartésien principalement par le fait qu'il appartient à la tendance expérimentale à laquelle se rattachent les travaux de Galilée, les études à l'université de Padoue et dans l'Accademia del Cimento. Mais aussi, par l'intérêt particulier qu'il attribue aux mouvements externes qui participent à la locomotion animale, et auxquels il consacre les vingt-trois chapitres, les deux cent vingt-quatre propositions et surtout les quatorze planches de la première partie du *De Motu Animalium*.

4) Les supports théoriques mathématiques, anatomiques et physiologiques

Borelli dans son travail fait référence à l'héritage mathématique de l'Antiquité dont la découverte et la diffusion constituent un des facteurs essentiels de l'évolution de la science au cours de la Renaissance avec l'expérimentation. En effet, la publication entre les dernières années du XV^e siècle et le début du XVII^e siècle des œuvres les plus importantes d'Euclide, d'Apollonius, d'Archimède, de Pappus d'Alexandrie, etc., a permis aux mathématiciens d'Occident d'accéder à des travaux dont certains étaient restés jusqu'alors pratiquement inconnus. Borelli empruntera pour étayer ses démonstrations certaines propositions de l'ouvrage géométrique le plus célèbre, *les Éléments d'Euclide* (Partie I. Proposition XX), mais aussi celles d'Archimède (Partie I. Propositions LXVII, CC, CCIV, CCVI, CCVII) qui auront une influence considérable sur le développement des mathématiques au XVII^e siècle.

L'auteur applique généralement la théorie des leviers aux mouvements des membres. Considérant les os comme de véritables leviers mis en jeu par des cordes qui sont les muscles, il compare la force vitale de ces derniers organes à la force appliquée au levier, le milieu de l'articulation au point d'appui et donne du mécanisme des mouvements et de la détermination des forces mouvantes, une théorie entièrement neuve : « *La découverte fondamentale de Borelli consiste en ce qu'il a fait voir, le premier, contre l'opinion alors généralement admise, que, lorsque les animaux surmontent une résistance même légère, leurs muscles emploient de très grandes forces. Il l'a démontré en faisant remarquer que l'insertion de chaque muscle est toujours beaucoup plus rapprochée du centre du mouvement, que n'est la résistance ou le poids, qu'il fait mouvoir autour de ce centre.* »³⁰⁵

³⁰⁵ Dezeimeris J.-E., Ollivier C., Raige-Delorme J. *Dictionnaire historique de la médecine ancienne et moderne*. [Tome premier, deuxième partie, Borelli (p. 468-472).] Paris : Béchot jeune ; Bruxelles ; Dépôt de la Librairie médicale française, 1826-1839.

Toutefois, Borelli a commis des erreurs par rapport aux principes de mécanique qu'il a employés. Plusieurs auteurs, notamment Pierre Varignon³⁰⁶, Antoine Parent, Henry Pemberton et Georg-Erhard Hamberger³⁰⁷ s'évertuèrent à critiquer et à corriger ses démonstrations. Montucla Jean-Etienne dans son *Histoire des mathématiques* de 1758 décrit en peu de mots et précisément le profil de l'œuvre de notre personnage : « *Je n'ai plus à parler que de deux Mécaniciens, qui mettront fin à cet article [celui sur..]. Ils sont tous les deux Italiens. L'un est Jean-Alphonse Borelli [L'autre M. Dominique Guglielmini], fort connu par ses divers ouvrages mathématiques, & surtout par celui de motu animalium. Ce Livre eut un grand succès, & en effet son auteur y déploie beaucoup d'art & de sagacité dans l'examen qu'il fait du mécanisme du corps humain, & dans les conjectures qu'il forme sur les vues différentes du créateur dans l'arrangement & le rapport des parties de cette merveilleuse machine. Un précis de quelques endroits choisis de ce livre seroit extrêmement curieux, mais à notre grand regret, nous sommes contraints de le supprimer. Cet ouvrage au reste n'est pas parfaitement exempt de fautes : quoique habile homme, Borelli a quelquefois contredit certains principes de mécanique qu'il croyait ne pouvoir concilier avec les faits (b), & cela l'a entraîné dans quelques erreurs. C'est pourquoi la Mécanique & la Physiologie même, ayant acquis depuis lui de nouvelles lumières, ce seroit un ouvrage utile, & digne de quelque Mécanicien versé dans l'anatomie, que de reprendre le travail de Borelli. Celui qui en formeroit l'entreprise, trouveroit des vues utiles dans les écrits de M. Parent³⁰⁸, qui a redressé & perfectionné en quelques points la théorie de Borelli. Il lui faudroit aussi consulter l'excellente dissertation de M. Jean Bernoulli, sur le mouvement musculaire.* »³⁰⁹

D'un autre côté, il s'est essentiellement trompé, en admettant que sur la terre, ainsi que dans l'air et l'eau, une force de réaction ou de répulsion fût capable de produire les mouvements progressifs des animaux ; alors que rien ne prouvait l'existence de cette force. Le médecin vitaliste Paul-Joseph Barthez dans son interprétation du *De motu animalium* souligne déjà cette erreur de Borelli et de bien d'autres savants : « *Mais il est certain que cette force de réaction ou de répulsion du sol est absolument imaginaire* »³¹⁰ plus éloignée dans son discours : « *Cette réaction n'a pas même cette légère vraisemblance, avec laquelle on attribue à la réaction du ressort de l'air, les mouvements progressifs des oiseaux dans le vol ; puisque*

³⁰⁶ Varignon P. *Projet d'une nouvelle Mécanique avec un Examen de l'opinion de M. Borelli, sur les propriétés des Poids suspendus par des Cordes*. Paris : Veuve d'Edme Martin, Jean Boudot, & Estienne Martin, 1687.

³⁰⁷ Hamberger G-E. *Physiologia medica, seu, de actionibus corporis humani sani doctrina principiis physicis a se editis itemque mathematicis atque anatomicis superstructa*. Jenae : Sumptibus Theod. Wilh. Ernest. Gütth, 1751.

³⁰⁸ Parent A. *Essais et recherches de mathématique et de physique*. Paris : chez Jean de Nully, 1713.

³⁰⁹ Montucla J.-E. *Histoire des mathématiques : dans laquelle on rend compte de leurs progrès depuis leurs origines jusqu'à nos jours*. Paris : A. Jombert, 1758.

³¹⁰ Barthez P.-Joseph. *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*. Carcassonne : Imprimerie de Pierre Polerre, 1798, p. 80.

l'eau, tant qu'elle est sous forme liquide, n'a point d'élasticité. »³¹¹ Des erreurs d'interprétations se multiplient aussi sur l'étiologie du mouvement musculaire, dont la cause prochaine s'imagine par un gonflement du muscle, résultant de l'effervescence du fluide nerveux avec le sang. Mais alors que toute la partie physiologique de son travail sur la contraction du muscle se révèle purement hypothétique, cela ne l'empêche pas de conjecturer correctement sur la base physiologique de la fonction du poumon. L'ambiguïté de l'efficacité de la démarche théorique et expérimentale de Borelli se trouve dans ces deux constats de processus physiologiques, ou l'impossible visibilité des résultats conduit à des erreurs d'interprétation.

Sur le plan des représentations explicatives de types « biophysiques », les illustrations et les figures exposées dans le *De Motu Animalium* sont d'un grand intérêt, car dans ces dernières, l'auteur dévoile comment il applique la géométrie euclidienne et la physique mécanique à ses observations du mouvement musculaire, aux principes des leviers et à l'identification du centre de gravité d'une personne. Son analyse semble préfigurer les descriptions newtoniennes des forces de la nature.

5) Une certaine conception anatomo-physiologique du muscle et de sa contraction

À l'époque de Borelli, la physiologie des muscles striés, héritée des anciens, se fonde principalement sur les œuvres de Claude Galien sans avoir profondément progressée jusqu'à la fin du XVI^e siècle. Elle reste encore à cette période rudimentaire, mais sa contestation émerge depuis les premiers pas de la physiologie animale moderne avec la découverte des lois de la circulation du sang exposées en 1628, dans *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*. Sa logique basée sur un raisonnement quantitatif stimule deux nouvelles orientations théoriques fondamentales pour la physiologie : le vitalisme et le mécanisme.

Borelli dispose de l'apport des connaissances anatomiques qu'il puise non seulement comme il le mentionne, dans l'œuvre magistrale de la myologie de Galien, mais aussi dans celle d'André Vésale et de ses successeurs à l'école d'Anatomie de Padoue. L'influence de cette dernière, bien qu'elle ne soit pas expressément mentionnée par Borelli en dépit de son rayonnement sur toute la science médicale de l'époque, reste évidente à travers la nomenclature myologique utilisée par lui. En effet, les descriptions

³¹¹ *ibid.*, p. 183.

de Galien souffrent de l'imprécision de sa terminologie, basée sur la numérotation des muscles au sein des grandes régions du corps. Encore à la fin du XVI^e siècle, *Carlo Ruini*, dans *l'Anatomie du Cheval*³¹² (1599), décrit le « vingt-septième muscle du cou » ou le « sixième muscle du genou ». Borelli, quant à lui, utilise la nomenclature élaborée par Jacques Dubois, dit *Sylvius* et qui avait été adoptée par Vésale, nonobstant les différends entre le maître et l'élève. Ainsi un grand nombre de muscles se désigne dans le *De Mottu Animalium* par les termes encore aujourd'hui en vigueur : « solei » (proposition XLI), « vasti » (XL), « recti et gastrocnemii » (LIV), « glutei » (LXXXIII)... Cette terminologie connote le texte de Borelli, qui bien qu'écrit en latin, semble étrangement moderne.

Dans cet ouvrage, qui seul a suffi pour assurer la gloire de Borelli, le mouvement musculaire est expliqué d'une manière nouvelle et avec une clarté étonnante, d'après les lois de la statique. L'œuvre renferme des informations précieuses sur la représentation à l'époque du mécanisme des différentes espèces de mouvements musculaires de l'homme et de l'animal sur terre, dans l'eau et l'air pour ce qui concerne le vol des oiseaux et la nage des poissons. Les travaux de Borelli, sur l'évaluation de ces forces musculaires lui permettent de démontrer que les muscles se situent, se conforment et s'assemblent sous un concours de circonstances propres à détruire et à rendre nulles une grande partie de leur action entre vitesse et force. De plus, il ne suffit pas pour estimer leurs forces réelles de mesurer les résistances qu'ils surmontent ; il faut avoir en égard, la distance de leur insertion au point d'appui et l'angle sous lequel ils parcourent les os dont ils déterminent le mouvement. Mais aussi le degré d'ouverture de l'angle formé par la rencontre des fibres tendineuses et des fibres charnues et le nombre d'articulations qu'ils traversent en allant de la première attache à la dernière ; enfin, connaître le partage des forces agissantes entre le point fixe et le point mobile de chaque muscle.

Borelli aborde son exposé depuis l'organisation et la constitution de la fibre. Cette logique descriptive convient, car la réunion d'une plus ou moins grande quantité de ces fibres contractiles, d'une ténuité extrême, et au moyen de tissus cellulaires dans lequel elles sont plongées, forme, ce que les savants du XVII^e siècle conçoivent comme l'unité motrice musculaire. D'où finalement le nom de fibre musculaire, sous lequel cet élément secondaire s'intitule généralement. Ce constituant représente la partie

³¹² Ruini C. *Anatomia del cavallo, infermita et suoi rimedii*. Venise : G. Bindoni, 1599.

essentielle de la fonction de la locomotion. Elle synthétise en miniature cette faculté qu'ont les animaux de changer en totalité ou en partie leurs rapports avec les corps extérieurs. Ces mêmes fibres en fonction de leurs points d'attaches et de leur orientation conditionnée par les articulations, déterminent le déplacement des os sur lesquels ils se fixent. Fondamentalement, Borelli prouve que les muscles agissent sur les membres avec des bras de levier courts, tandis que les parties du corps et de la charge portées se déplacent avec des bras de levier beaucoup plus longs. En conséquence, les articulations transmettent des forces qui sont plusieurs fois le poids de la partie soutenue du corps. Borelli calcule selon cette logique la force exercée par un bras supportant une charge dans différentes positions. Mais seulement en 1954 Pauwels résoudra ce problème exactement en critiquant et en corrigeant un travail préalable de Braune et de Fischer.

L'animal, tel que le considère Borelli, apparaît surtout comme « post-galiléen » dans la mesure où il possède déjà un « centre de gravité » qui conditionne ses explications (Proposition XVII : « *Le membre AB est poussé vers le bas par la masse du centre de gravité H dans la direction verticale HI. [...] Si les os GF, AB sont verticaux, l'os AB maintenu par les ligaments ou soutenu par la cavité de l'os FA ne se déplacera pas non plus tant que son centre de gravité est juste au-dessus de C parce que, d'une part, l'os AB ne peut pas fléchir spontanément si le bras de levier de son centre de gravité est 0 et, d'autre part, le muscle appliqué au centre de la rotation n'exerce aucun moment contre la résistance de l'os qu'elle ne soutient pas.* »). Sa locomotion se soumet au principe de l'inertie et à la loi de la chute des corps d'où l'intérêt accordé aux postures dont l'étude préliminaire est indispensable pour bien comprendre le mouvement (Proposition CXXXV : « *Les hommes peuvent se tenir érigés, leur corps entier restant vertical. Alors les colonnes osseuses constituées par le tibia, le fémur et la colonne vertébrale se tiennent au-dessus les uns des autres. Mais la ligne d'appui du centre de gravité du corps entier doit tomber verticalement entre les semelles plantaires ou sur une seule semelle du pied. Autrement, le corps ne pourrait pas se tenir et tomberait du côté vers lequel la ligne joignant son centre de gravité et l'appui est inclinée. En position droite, les os se comportent comme des colonnes : leur force assure l'appui et il ne devrait pas y avoir ni fatigue ni effort. Mais cette position droite est instable en raison des articulations très glissantes. Ceci explique pourquoi les hommes debout oscillent sans interruption. Ils ont besoin de leurs muscles pour corriger les déplacements et pour empêcher le fléchissement* ». Être immobile est déjà, sur un pan musculaire, agir pour ne pas choir.

C'est aussi en disciple de Galilée que se pose Borelli quand il affirme que les animaux les plus légers effectuent, toutes choses étant égales d'ailleurs, les sauts les plus grands. Il établit ce corollaire selon l'utilisation de la démonstration par Galilée que le poids augmente selon le cube des dimensions linéaires, tandis que la section transversale

dont dépend la force n'augmente que selon le carré de ces mêmes dimensions (De Motu). En effet, la notion que la solidité et la résistance des machines, naturelles ou artificielles, dépend de leur taille avait été exprimée par Galilée à plusieurs reprises non seulement dans ses traités pisans sur le mouvement, mais aussi dans le *Dialogue des Sciences nouvelles*³¹³.

Mais il ne suffit pas de reconnaître dans Borelli les influences de ses prédécesseurs ou contemporains : on est tenté de voir aussi dans quelques propositions du *De Motu Animalium* de fulgurantes « presciences ». Ainsi la force de sens contraire qu'exerce sur le sol l'extension des articulations du membre postérieur sous-tend-elle le principe, alors non avéré, de l'action et de la réaction. (Proposition CLVIII : « *Pendant la marche, le corps humain est toujours supporté par le sol. Il est porté par la force des jambes agissant comme colonnes osseuses au prix de peu d'effort des muscles et peu de gêne due à la sensation de compression des tendons et à l'étirement des membranes. D'ailleurs, pendant le double appui, le déplacement vers l'avant du centre de gravité résulte du rallongement de la jambe postérieure par la flexion plantaire et vers l'arrière par l'impulsion sur le sol. Le corps entier est alors au-dessus de la jambe antérieure et la poussée un peu vers l'avant. Il se déplace vers l'avant horizontalement. Alors la jambe postérieure allongée décolle du sol avec la flexion de la hanche et du genou et la dorsiflexion de la cheville. Ce mouvement est effectué par les muscles faisant osciller la jambe, qui soulèvent moins qu'un quart de la masse corporelle* ».) Ou encore, le fait qu'à allure lente le quadrupède ne puisse soulever qu'un pied à la fois suggère la notion d'un équilibre dynamique différent dans son principe de l'équilibre statique et fonction de la vitesse.

Les problèmes ainsi traités par Borelli ont reçu les réponses que permettaient la physique et la mécanique du XVII^e siècle. Ils se posent dans les siècles qui suivirent en d'autres termes et à un autre niveau, grâce aux informations sur le mouvement que fournissent les enregistrements et les expérimentations de toute nature... Mais ces recherches, tout comme les siennes, dépendent étroitement des techniques et des méthodes de l'époque : aussi sophistiquées qu'elles puissent paraître, elles n'en sont pas moins rudimentaires au regard de la complexité des phénomènes étudiés, et les résultats ne seront jamais qu'une étape vers une meilleure connaissance de la locomotion animale. Il faut donc relativiser les critiques par rapport au contexte technique et théorique de chaque époque historique. Cette esquisse générale ne prétend pas juger l'apport de Borelli ni de décider de la place qui lui revient dans l'histoire des idées scientifique. Il

³¹³ Galilei G. *Discorsi, e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze, attenenti alla mecanica, & i movimenti locali*. Bologna : [s.n.], 1655.

Partie II. Chapitre 2. Considérations générales sur le *De motu animalium*

convient seulement de souligner que la lecture de la première partie du *De Motu Animalium* reste encore, pour celui qui s'intéresse à la biomécanique et à la locomotion animale, d'une étonnante actualité.

Chapitre 3. Remarques sur certaines propositions du *De motu animalium*

1) De l'action des os et de leurs dépendances dans la locomotion : les leviers

Borelli après une explication de sa conception de la cause du mouvement dans le chapitre I : « Pour débattre méthodiquement sur le déplacement des animaux on doit considérer tous les types de mouvements que les animaux effectuent. Tout d'abord, on sait qu'un animal peut aller d'un endroit à l'autre en déplaçant toute sa masse. Si ce déplacement a lieu sur le sol, il est appelé marche. S'il a lieu dans l'eau il s'intitule nage. S'il se réalise dans l'air il se nomme vol. On doit également considérer les différents mouvements et déplacements des parties de l'animal qui sont soit externes, s'ils sont effectués par les mains, les cuisses, la tête, etc. , soit internes comme ceux des viscères, du cœur, des artères, des veines, des muscles, des os et d'autres parties. Il y a également les écoulements et les mouvements des liquides, comme le sang et d'autres fluides, par les cavités et les vaisseaux. Pour étudier les trajets, les organes et les mécanismes par lesquels la Nature effectue les mouvements externes, nous ne devons pas négliger ce qui est évident : tout le monde convient que le principe, la cause efficace du mouvement des animaux est l'âme. Les animaux vivent par leur âme et continuent à se déplacer tant qu'ils vivent. Quand ils meurent, c'est-à-dire quand l'âme cesse de fonctionner, la machine animale reste inerte et immobile. »³¹⁴

Il aborde la locomotion par la configuration des muscles dans le chapitre II : « Finalement, les différents types de muscles doivent être mentionnés aussi bien que les parties qu'ils actionnent ; comment ils agissent et dans quelle direction. »³¹⁵ Très rapidement, la logique expérimentale de ses études transparaît et caractérise la richesse culturelle de sa démarche et de son analyse : « Jusqu'ici il a été étudié de quelles façons la commande de l'âme et la faculté motrice sont transmises au muscle. Le bon sens et l'expérience répondent à cette question. Les artères, les veines et les nerfs arrivent au muscle de l'extérieur. Ni les artères ni les veines ne transmettent cette commande puisqu'en dépit de la ligature ou de la section des artères et des veines, le muscle continue à effectuer les mouvements comme auparavant, quand les vaisseaux étaient intacts. En conséquence, la faculté motrice n'est pas transmise à travers les veines ou les artères vers les muscles pour être déplacée. Au contraire, immédiatement après la section ou la ligature du nerf qui termine dans un muscle n'importe quel mouvement de ce muscle s'arrête et le muscle reste inerte et aussi immobile que dans un cadavre. Par conséquent, le nerf représente le chemin à travers lequel la faculté motrice transmet par l'intermédiaire de l'âme au muscle la commande pour être stimulé, déplacé ou porté. »³¹⁶ Où plus loin « Les fibres individuelles gonflent après avoir été bouillies. Sous un

³¹⁴ Chapitre I.

³¹⁵ Chapitre II, proposition III.

³¹⁶ Chapitre I.

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

microscope elles apparaissent comme des petits cylindres semblables aux brindilles d'un arbre. Elles ne semblent pas être des tubes vides comme sont les tiges des roseaux. Elles semblent être remplies par une substance, comme de la moelle qui doit être spongieuse comme dans le sureau »³¹⁷.

Ces deux extraits, représentent de par leurs informations, un positionnement sur les modes opératoires, l'utilisation du microscope, mais aussi les présupposés théoriques sur la stimulation de la contraction musculaire, la constitution de la fibre elle-même. De plus, avec cette démarche, ces hypothèses scientifiques peuvent s'exposer à la richesse de l'expertise et de la critique expérimentale.

Cependant la compréhension du déplacement de l'homme ou de l'animal, lors de certains mouvements caractéristiques ou spécifiques s'appuie sur l'étude de l'appareil locomoteur lui-même. Il représente un des chapitres les plus importants de l'anatomie. L'étude du squelette, des articulations et des muscles, un peu aride en elle-même, devient plus intéressante lorsqu'elle s'accompagne de l'analyse du mécanisme des mouvements. D'ailleurs, le mécanisme normal des articulations mérite de s'étudier avec soin, car il conditionne l'orientation du mouvement.

Malgré les étapes bien définies de son raisonnement et les précautions empruntées, Borelli saute la présentation et les définitions aux préalables concernant la charpente articulaire et squelettique des corps qui détermine l'orientation du déplacement. En effet, les corps des animaux vertébrés et de l'homme sont soumis à l'action de différentes forces comme la pesanteur, les tractions musculaires, les chocs, qui tendent à modifier la forme de ses diverses parties, à les déplacer, à les mouvoir. Cette charpente, formée par le squelette et les tissus de soutien, s'oppose aux déformations, protège les organes et enfin offre aux muscles les leviers destinés à transmettre au loin l'effort musculaire. Le squelette des vertébrés est constitué par des pièces résistantes, articulées entre elles dans les divers segments du corps, l'axe rigide autour duquel se groupent les muscles et les autres parties molles qui orientent le sens des mouvements.

1. Petite logique des leviers appliquée à l'anatomie fonctionnelle

Comme les muscles s'implantent sur les os, et que ces segments sont articulés entre eux de manière à pouvoir se mouvoir sur une de leurs extrémités, un muscle ne peut se contracter, sans que l'os auquel il s'attache ne cède à la traction exercée sur lui.

³¹⁷ Chapitre II, proposition I.

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

En effet, en se mouvant passivement sur l'une ou l'autre de leurs extrémités, consécutivement aux contractions des muscles, les os servent à la locomotion. Tandis que pour la production des mouvements la contractilité musculaire ou *force motrice* constitue cette fonction, les os peuvent s'assimiler à des *leviers* à mouvoir.

Dès lors non seulement la force et la vitesse avec lesquelles un os se déplacera seront fonction du nombre de muscles qui s'implantent ; et de la rapidité avec laquelle la contraction de ces muscles s'effectue. Mais encore, il existera de nombreuses modifications dans les résultats, selon : la direction des fibres des muscles moteurs, la disposition de leurs attaches à l'os, en un mot, des rapports mécaniques liés avec cet os. En effet, une fois la contractilité musculaire reconnue comme force motrice, et l'os considéré comme le levier qui sert à mouvoir tous les principes de la mécanique peuvent s'appliquer à celui-ci.

Ainsi Borelli étudie le déplacement humain et animal comme dans toute analyse mécanique qui concerne la mise en œuvre de levier, trois parties se distinguent : l'une autour de laquelle le levier se meut, correspondant au *point d'appui ou centre de mouvement* ; l'autre la force appliquée qui le meut correspondant à la *puissance*, et enfin la force qui s'oppose au mouvement, désignée par la *résistance*. L'action des leviers s'exprime par l'équation d'équilibre, à savoir que la puissance (P) multipliée par son bras de levier (p) égale la résistance (R) multipliée par le sien (r) donc :

$$P \times p = R \times r \quad \text{Équation 1}$$

D'où la puissance (P) nécessaire pour équilibrer une résistance (R) peut se déduire de la relation :

$$P = R \times r/p \quad \text{Équation 2}$$

Ainsi le rapport de la puissance et de la résistance est inversement proportionnel à celui des bras de levier :

$$P/R = r/p \quad \text{Équation 3}$$

De plus c'est du rapport du produit de la résistance (R) par son déplacement sur celui de la force (F) par son déplacement que se calcule l'efficacité (E) du levier :

$$E = (\text{Résistance} \times \text{son déplacement})/(\text{Force} \times \text{son déplacement}) \quad \text{Équation 4}$$

Aujourd'hui, la majorité des travaux publiés en analyse du mouvement et en chirurgie se ramène à utiliser cette machine simple dont le but équilibre ou déplace une force (résistance) au moyen d'une autre force (puissance). En effet, les problèmes posés

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

par les forces peuvent se résoudre quand une articulation ou un ensemble de chaînons osseux s'assimilent à une combinaison de leviers où les forces musculaires imposent une puissance.

Selon le point du levier auquel se trouve située chacune de ces trois parties, on distingue trois espèces de leviers : celui du *premier genre ou interappui (PaR)*, dans lequel la puissance est à une des extrémités du levier, la résistance à l'autre, et le point d'appui dans l'intervalle : celui du *deuxième genre ou interrésistant (aRP)*, dans lequel le point d'appui et la puissance sont chacun à une extrémité, et la résistance entre les deux : et celui du *troisième genre ou interpuissant (aPR)*, dans lequel la puissance se situe entre la résistance et le point d'appui.

De plus, selon ces divers genres de leviers, la puissance et la résistance développent d'autant plus d'intensité, qu'elles agissent par un bras de levier plus long, s'appliquant ainsi à un point du levier plus distant du centre de mouvement. De ce fait, le levier du deuxième genre (*aRP*) se révèle de tous, le plus avantageux pour la force, puisque, la puissance y étant à une des extrémités et le point d'appui à l'autre, le bras de la puissance y est le plus long possible. Au contraire le levier du troisième genre (*aPR*) se montre de tous le plus défavorable à cet égard, la résistance y étant ce qu'était la puissance dans le levier du deuxième genre. En compensation, le levier du troisième genre est le plus favorable pour la rapidité et l'étendue des mouvements, puisqu'il suffit qu'un petit espace soit parcouru par le levier de la puissance pour qu'il en soit parcouru un plus grand par le levier de la résistance qui se prolonge au-delà du premier.

Enfin l'effet, le plus important se développe quand la puissance se situe perpendiculaire au levier à mouvoir, parce qu'alors elle est utilisée tout entière à vaincre la résistance ; et qu'au contraire cet effet diminue à mesure que son insertion au levier s'avère plus oblique, une partie de cette puissance tendant alors à mouvoir le levier dans sa propre direction, et étant par conséquent perdue relativement à la résistance.

L'ensemble de ces lois mécanique peuvent s'appliquer aux os dans l'acte de la locomotion. D'abord, évidemment, tout os en mouvement a son *point d'appui* à l'articulation dans laquelle il se meut, sa *puissance* au point de sa surface auquel sont implantés les muscles qui le meuvent, et sa *résistance* à l'autre lieu de son étendue où se font sentir son poids et celui des pièces dont il est le soutien. De plus, comme, dans tout os se mouvant, l'articulation sur laquelle se fait le mouvement est tantôt entre le point d'insertion des muscles moteurs et celui où agit la résistance, tantôt à une des extrémités de l'os, l'insertion des muscles moteurs étant à l'autre, quelquefois enfin à

une des extrémités encore, mais la résistance étant à l'autre, et l'insertion des muscles moteurs dans l'intervalle; il en résulte que cet os représente tour à tour un levier du premier, ou du second, ou du troisième genre. Dès lors, il doit avoir les attributs mécaniques du genre de levier qu'il constitue.

De ce fait, lorsque les muscles moteurs s'inséreront à l'extrémité de l'os à mouvoir, l'articulation dans laquelle doit se passer le mouvement étant à l'autre extrémité, les mouvements seront plus faciles, exigeront moins de force, mais seront moins rapides et moins étendus; et qu'au contraire, lorsque ces muscles s'inséreront entre les deux extrémités de l'os, l'articulation mobile étant à l'une, et la résistance à l'autre, les mouvements exigeront d'autant plus de force que cette insertion sera plus rapprochée de l'articulation, mais en compensation auront plus de rapidité et d'étendue. Enfin, les muscles s'insèrent aux os à mouvoir, tantôt perpendiculairement têt plus ou moins obliquement par conséquent la force qu'ils déploient s'utilise en totalité dans le premier cas, et au contraire partiellement dans le second.

Borelli montre finalement l'un des points essentiels de son œuvre, constituant l'excellence de sa particularité par rapport à ses prédécesseurs. Ainsi, pour analyser dans quelle mesure les os cèdent à la traction qu'exercent sur eux les muscles contractés, il ne suffisait pas d'avoir égard au nombre, au volume de ces muscles, à l'énergie et à la rapidité avec lesquelles ont lieu, leurs contractions ; mais il fallait encore apprécier leurs rapports mécaniques avec les os, savoir quel genre de levier représentent ceux-ci, sous quel degré de perpendicularité ou d'obliquité les muscles leur sont attachés, enfin à quelle distance cette attache est de l'articulation mobile, quand le levier osseux est du premier ou du troisième genre.

Sous tous, ces rapports, le corps humain est édifié le plus merveilleusement possible, partout il offre les dispositions mécaniques les plus favorables, soit relativement au résultat particulier qu'il s'agissait d'obtenir, soit relativement à ce qu'exigeait l'ensemble général de l'économie motrice. Ainsi quand une grande résistance doit se vaincre, toutes les conditions se trouvent réunies pour engendrer une grande force ; des muscles en grand nombre, d'un volume important, insérés perpendiculairement aux os surtout implantés à ceux-ci de manière à en faire des leviers du deuxième genre (*aRP*).

Au contraire quand il importe d'avoir des mouvements rapides et amples le levier du troisième genre devient nécessaire, les muscles y sont insérés très près du point d'appui. Ces deux dernières dispositions prédominent dans l'appareil locomoteur de l'homme où de plus les muscles s'insèrent obliquement aux os. De ce fait, sous ce triple

rapport, les muscles de l'homme nécessitent de déployer des forces très importantes pour produire des mouvements, puisqu'ils se trouvent par rapport aux os dans des conditions mécaniques les plus défavorables à la force, ainsi que le démontre en précurseur Borelli. Mais il n'y a qu'une vue superficielle qui pourrait en inférer que la Nature ne montre pas sa sagesse accoutumée. Si, dans l'appareil locomoteur, elle a employé les dispositions mécaniques les moins favorables à la force, c'est pour obtenir d'autres effets, qui lui importaient davantage.

La Nature préfère le levier du troisième genre, et insère les muscles très près de l'articulation, ces deux dispositions rendent plus favorables aux mouvements l'étendue et la rapidité ce qui semblait très important pour favoriser son développement et son évolution. En effet, en multipliant le nombre de muscles et celui des fibres qui composent chacun d'eux, la Nature pouvait, en dernière analyse, se procurer toute la force motrice nécessaire : cependant, l'étendue du mouvement dépendant de la quantité de raccourcissement du muscle, qui correspond au plus du tiers de cet organe, qui ne peut jamais être long, des dispositions mécaniques convenables suppléent au rôle seul des muscles. Quant à l'obliquité des muscles par rapport aux os, il y avait obligation de donner à nos membres des formes et des proportions fines ; et dès lors il était indispensable que les muscles fussent couchés sur les os dans une direction presque parallèle aux axes, de ces leviers, et attachés à ces organes de manière à constituer des leviers du troisième genre.

Ces considérations sur le fonctionnement des leviers sont fondamentales chez Borelli et à juste titre, car depuis ces machines mécaniques simples il inverse les réflexions communes et ancestrales sur le travail musculaire. L'efficacité du muscle serait remise en question et par-delà, la Nature, mère des sagesse, disciple d'un agencement des mouvements et des déplacements à moindre coût. Cette pensée, vérifiée, fera la faveur de la notoriété de Borelli dans toutes les biographies qui lui seront consacrées. Afonso aboutit à cette remise en cause depuis l'analyse anatomique des positions des points d'insertions et les calculs de tractions selon l'orientation des faisceaux musculaires. Il se positionne très clairement depuis une analyse épistémologique des connaissances des anciens sur la relation entre le travail musculaire et le travail à accomplir. La proposition VIII expose le cheminement historique de cette relation jusqu'au questionnement de l'auteur du *De motu animalium*.

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

Il est communément pensé que la Nature soulève des charges considérables en utilisant les machines des muscles avec une force faible de déplacement.

L'amplitude de la force vitale des muscles doit être mesurée. Cette force soutient, soulève et déplace non seulement un bras ou une jambe, mais aussi la machine animale entière, lui permettant même de danser. Au demeurant de la masse de l'animal assez lourde d'elle-même, cette force porte, tire et pousse des charges considérables.

Aristote surtout a traité cette discipline. Il n'a pas identifié les muscles, mais imaginé des esprits qui tirent et poussent les membres. Cet auteur perspicace a sensiblement remarqué comment il serait difficile pour déplacer et pousser l'énorme masse d'un éléphant par l'esprit tenu ou le vent. Il fait face à cette difficulté en disant que la Nature déplace les articulations et les membres de l'animal en employant une force très faible. Il disait que cela résulte du travail de la machine avec laquelle des mouvements initialement petits, progressivement conduisent à de grands et multiples déplacements. De la même façon, le mouvement faible et facile d'une gaule ou d'un gouvernail provoque les déplacements importants des proues de navires. Il a alors considéré le rôle de la gaule suivant un point de vue mécanique et dit que la marche est effectuée depuis un point de levier. Par conséquent, il n'est pas surprenant que des charges énormes peuvent être bougées et déplacées avec une force faible. Lucrece a employé le même exemple.

« Une main dirige le bateau qui se déplace vers l'avant avec l'orientation que vous voulez de même qu'un gouvernail l'oriente vers une direction. »

Et alors mentionnant d'autres instruments il disait :

« À l'aide de poulies et de tambours d'enroulage on déplace beaucoup de choses lourdes et la machine les soulève avec peu d'effort. »

Gassendi aussi prétend que la faculté de l'animal utilisant une machine peut déplacer des charges lourdes avec de faibles forces, mais il doute que des leviers, des poulies et des tambours d'enroulages peuvent être trouvés chez les animaux puisque seuls les muscles sont observés plutôt comme les cordes de poulies. Cependant, il trouve dans le muscle une adaptation mécanique faite de poulies et de cordes. Il dit que les plis qui apparaissent dans les fibres des muscles quand la longueur du muscle se raccourcit par contraction jouent le rôle des poulies. Une série de poulies résulte de ces plis comme dans le palan dont la force est presque illimitée.

Galien dit également qu'un tendon est comme un levier. Il pense que, par conséquent, une faible force de la faculté animale peut tirer et déplacer des charges lourdes.

D'autres également, mais pour une raison différente, prétendent que les muscles soulèvent des charges lourdes par une machine, en dépit d'une force faible des esprits.

Cette opinion générale semble être si probable que, à ma connaissance, il n'est pas étonnant, qu'elle n'ait été remise en cause par personne. Qui en effet serait assez stupide pour rechercher une machine pour déplacer une très légère masse avec une force importante, c.-à-d. dire utiliser une machine ou un dispositif pour ne pas économiser des forces, mais plutôt pour dépenser des forces ? C'est comme si quelqu'un qui peut déplacer et porter une masse d'une livre directement sans aucune machine en exerçant une force égale à une livre, avec une totale négligence pour l'économie, recherchait des leviers, des poulies et d'autres instruments exigeant des forces dix ou cent fois plus grandes pour soulever cette seule livre. Et, si ceci est considéré comme vraiment stupide, comment est-il possible que la sage Nature, recherchant partout l'économie, la simplicité et la facilité, créer avec des machines animales une formidable industrie pour déplacer, non pas des charges lourdes avec une petite force, mais, au contraire, des charges légères avec une force presque illimitée ? Ceci semble étrange et contre le bon sens, j'en conviens, mais je peux d'une façon convaincante démontrer que c'est ce qui se produit et, me donnant la permission de le dire, que les défenseurs de l'opinion opposée se sont trompés. Je démontrerai que de multiples et différentes machines sont utilisées réellement dans les mouvements des animaux, mais que des charges légères sont portées par une force importante et énergique plutôt que des charges lourdes soutenues par une force faible. La force motrice est telle que souvent, elle est cent ou mille fois plus grande que la masse des os et des membres qui sont levés et n'est jamais plus faible. C'est le sujet principal de la présente première partie de mon travail.

Enfin, indépendamment de ce que, dans l'appareil locomoteur, la nature sacrifie tour à tour, selon ses besoins, ces diverses dispositions mécaniques les unes aux autres, ce qui est déjà une preuve de sa sagesse, que de précautions accessoires on la voit prendre pour amoindrir les effets des dispositions défavorables auxquelles elle a été obligée de se soumettre. Ici, pour augmenter la force, elle multiplie le nombre des muscles et celui de leurs fibres ; là, pour atténuer les effets du parallélisme de ces

organes, elle emploie des os sésamoïdes³¹⁸, elle fait saillir en dehors les éminences auxquelles sont insérés les muscles ; elle permet quantité d'amplitude aux extrémités articulaires des os, etc. Que de dispositions anatomiques elle rassemble pour faire produire facilement, avec précision et sans crainte de déplacement des os, tous les mouvements possibles et nécessaires.

Les diverses surfaces articulaires ont partout une disposition qui est en rapport avec la direction que doivent avoir les mouvements. Des cartilages revêtent ces surfaces articulaires, et facilitent les mouvements par leur élasticité. Divers organes albuginés³¹⁹, ligaments, capsules articulaires entourent toutes les articulations, et préviennent les déplacements des os par leur solidité, tout en permettant les mouvements par leur souplesse. La synovie les lubrifie, ainsi que tous les lieux où il y a des glissements, et remplit l'office de cette huile par laquelle nous cherchons à atténuer les frottements dans nos machines artificielles. Enfin des gaines tendineuses, des gouttières osseuses fixent les tendons, et précisent ainsi la direction des mouvements ; de grandes et solides aponévroses recouvrent tous les muscles d'une seule et même partie, et en préviennent les déplacements, etc. Tout dans l'appareil locomoteur est donc aussi sagement établi que dans les autres appareils. Les derniers faits que nous venons de présenter à l'appui de cette assertion devaient d'autant plus être rappelés, qu'ils ont trait au jeu des diverses parties de l'appareil locomoteur.

En somme, les os étant passifs dans la locomotion, d'autres éléments tant organiques que mécaniques règlent la direction, l'étendue et la force des mouvements qu'ils exécutent. Pour la direction, ce sera : l'espèce d'articulation que présente l'os ; la situation des muscles moteurs par rapport à cet os ; le degré d'obliquité de leurs fibres ; et enfin les dispositions de leurs tendons, selon que ces tendons sont libres, ou fixés dans une gouttière, ou réfléchis par une poulie. En effet, la direction des mouvements ne peut être la même dans une arthrodie³²⁰ et une ginglyme³²¹ ; de même, l'obliquité des fibres du muscle a une influence ; car, lors de la contraction, toute fibre musculaire se

³¹⁸ Se dit des petits os de forme arrondie, situés au niveau des articulations de la main ou du pied, ou qui se développent dans l'épaisseur de certains tendons.

³¹⁹ Il se dit des membranes, des tissus dont la couleur est blanche.

³²⁰ Articulation mobile à surface plane ou peu arrondie, par exemple, l'articulation entre l'omoplate et la clavicule.

³²¹ Articulation composée de deux surfaces articulaires formant une charnière, ne permettant de flexion que dans un seul sens du type articulation huméro-ulnaire (entre le cubitus et l'humérus au niveau du coude).

meut en ligne droite, et tire la résistance dans la direction de cette ligne ; et celle-ci ne peut être la même pour des fibres qui sont diversement obliques.

L'amplitude des mouvements tient ; au mode d'articulation, chacun a sa mesure sous ce rapport ; au degré de l'influx nerveux et de la volonté ; à la longueur des fibres des muscles, car plus ces fibres sont longues, plus le raccourcissement qu'elles éprouvent est considérable, en conséquence plus le mouvement qu'elles produisent est étendu ; au genre de levier que fait l'os déplacé, le levier du troisième genre est le plus avantageux sous ce rapport, enfin ; à la distance qui existe dans ce dernier cas entre le point d'appui et l'insertion des muscles moteurs, plus cette insertion est près de l'articulation, plus les mouvements sont étendus.

Enfin, la force avec laquelle un os se déplace dépend : du degré d'énergie de la volonté et de l'influx nerveux, du nombre de muscles et de celui des fibres qui les composent, car chaque fibre peut être considérée comme un petit muscle ; du degré d'irritabilité intrinsèque des muscles, irritabilité variant selon la typologie de chacun ; de la direction des fibres qui composent ces muscles les unes par rapport aux autres, la force étant moindre quand ces fibres sont obliques ; de la direction perpendiculaire ou plus ou moins oblique selon laquelle le tendon de terminaison s'attache à l'os ; du genre de levier que fait déplacer l'os, et enfin de la distance du point d'appui à l'endroit où s'insère le muscle, s'il correspond à un levier du troisième genre.

2. Exemple critique de l'application du levier sur la flexion de l'avant-bras

Borelli envisage dans la première partie du *De motu animalium* de déterminer l'évaluation numérique de la force intrinsèque des principaux muscles du corps humain. La présentation critique de son analyse par la théorie mécanique des leviers pour calculer la puissance motrice et les moments des muscles fléchisseurs du coude dans le chapitre VIII se révèle utile pour démontrer comment il procède. Finalement, avec la proposition XXII que Borelli utilise pour calculer soi-disant dans la simplicité et la progressivité, l'amplitude de la force apparente qui s'exerce lorsque l'avant-bras se trouve en extension, position supination horizontale, le cheminement se révèle une démonstration difficile.

Les muscles fléchisseurs de l'avant-bras qu'il utilise pour la démonstration se composent, du biceps brachial (*musculus biceps brachii*) et du brachial antérieur (*musculus brachialis*) pour développer une force correspondant à plus de vingt fois la masse soulevée. Il prend soin de se protéger de la critique des anatomistes et sous-entend

les limites de ses études quand il avance : « *Nous donnerons quelques exemples clairs des muscles importants, négligeant les moins importants qui par leur nature sont semblables, afin d'éviter de développer ce livre en un volume exagéré.* »³²² Cependant, en plus des trois muscles fléchisseurs principaux du coude que sont : le biceps, le brachial antérieur et le long supinateur, d'autres muscles comme les radiaux externes et les épitrochléens (le rond pronateur, le grand palmaire, le petit palmaire, le cubital antérieur, le fléchisseur commun superficiel des doigts, le premier et le deuxième radial externe) ont aussi une action fléchissant bien qu'avec une puissance faible, mais rend ce mouvement difficile à analyser devant l'interaction pluri-musculaire.

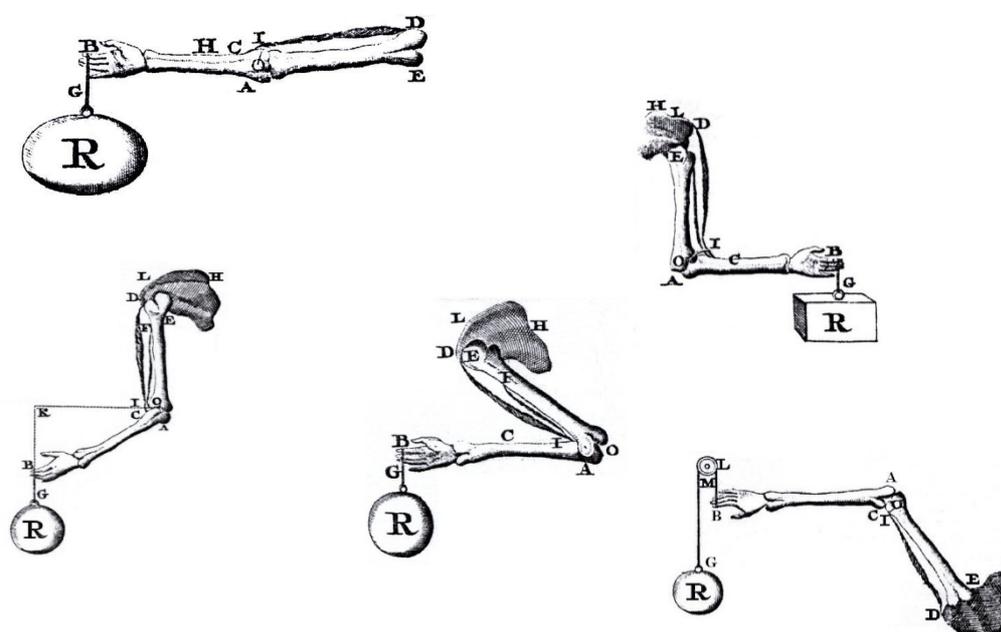


Figure 27. Différents protocoles pour mesurer la force exercée par les muscles du bras (Chapitre VIII).

D'autre part il faut souligner la complexité de l'articulation du coude qui unit l'humérus aux deux os de l'avant-bras, comprenant deux articulations distinctes, l'articulation huméro-cubitale et l'articulation huméro-radiale qui participent au mouvement de flexion et d'extension, mais aussi de pronation et de supination. La flexion et l'extension de l'avant-bras consistent en un mouvement de rotation autour de l'axe de la trochlée humérale. De plus dans la flexion, la face antérieure de l'avant-bras se rapproche de la face antérieure du bras et s'en éloigne dans l'extension. Comme l'articulation du coude est une charnière, il est plus ou moins simple de reconnaître

³²² *De motu animalium*, Chapitre VIII, p. 58.

l'action des muscles du coude. En effet, tous les muscles qui passent au-devant de l'axe de la charnière sont fléchisseurs, tous ceux qui passent en arrière de l'axe sont extenseurs. Les fléchisseurs du coude se révèlent plus volumineux et plus puissants que les extenseurs avec une plus grande importance fonctionnelle. En effet la paralysie des fléchisseurs crée une impotence très préjudiciable à celui qui en est atteint alors qu'avec une paralysie des extenseurs, le malade peut encore se servir de son membre supérieur de façon assez utile, car, dans la plupart des positions, la pesanteur se charge de ramener l'avant-bras en extension quand les fléchisseurs se relâchent. L'extension de l'avant-bras étant impossible que dans les positions où la pesanteur ne peut la produire, par exemple lorsque le bras est élevé verticalement.

Cependant même si Borelli commence « *à partir des opérations les plus faciles et les plus simples* »³²³, les mouvements de l'avant-bras et notamment ceux réalisés par les fléchisseurs du coude se révèlent complexes. En effet, le biceps brachial est un muscle proéminent situé sur le devant et le haut du bras, au détriment de la simplicité de Borelli qui se compose de deux chefs musculaires. Le long biceps prend son origine au-dessus de la cavité glénoïde de la scapula par un tendon qui traverse d'abord la capsule, se coude, passe entre le tubercule majeur de l'humérus dit trochiter ou grosse tubérosité et dans la coulisse bicipitale. De ce tendon naissent des fibres charnues qui rencontrent celles du court biceps. Le court biceps naît par un tendon sur l'apophyse coracoïde puis devient charnu et rejoint le long biceps. Les chefs longent le bras puis forment un tendon unique qui passe en avant de l'articulation du coude et s'insère à la tubérosité du radius et irradie, par son aponévrose bicipitale, en direction ulnaire dans le fascia antébrachial. L'action du biceps brachial au niveau du coude est fléchisseuse, mais intervient aussi et principalement dans la supination de l'avant-bras quand le coude est fléchi. Au niveau de l'épaule, il participe à l'antéimpulsion (abduction frontale). Toutefois, le long biceps participe à l'abduction de l'épaule tandis que le court biceps participe pour sa part à l'adduction. Ces détails uniquement pour le biceps brachial ne sont pas inutiles, car intervient dans l'étude de la flexion du coude le centre articulaire, mais aussi le positionnement des insertions musculaires par rapport à ce point d'appui qui influencent l'efficacité du levier de ce muscle, donc indirectement la vitesse et la force de flexion du coude.

³²³ op. cit., p. 57.

Borelli se propose donc d'évaluer numériquement la force intrinsèque des principaux muscles du corps humain. Le lecteur relève que l'auteur se situe quantitativement en rupture avec l'intitulé de son œuvre le *De motu animalium* qui finalement traite très peu des animaux proportionnellement à l'homme. Sans doute une démarche voilée afin d'éviter le courroux encore possible à cette époque des instances religieuses.

Concernant le chapitre VIII sur la flexion du coude il aborde son exposé depuis une hypothèse fautive « *Mécaniquement les amplitudes des forces qui s'équilibrent sont proportionnelles aux vitesses ou aux distances qui seraient parcourues par les forces pendant la même durée si elles se déplaçaient.* » Or c'est le contraire qui est vrai, comme présenté initialement deux forces qui se font équilibre aux deux extrémités d'une machine quelconque sont entre elles dans le rapport inverse des chemins parcourus, dans le même temps, par leur point d'application, estimés suivant leur direction respective. Cependant, Borelli développe un raisonnement correct dans la proposition XIII du chapitre VI « *Si deux forces opposées sont appliquées à l'extrémité d'un levier, l'un agissant perpendiculaire et l'autre tirant obliquement, et s'ils ont les mêmes moments, le rapport de l'amplitude de la force tirant obliquement à celle qui agit perpendiculairement est égal au rapport de la longueur du levier à la distance de la ligne d'action oblique par rapport au point d'appui.* (Tab. II, Fig. 6)

*Deux forces opposées C et E sont appliquées à l'extrémité B du levier AB dont le point d'appui est A. Leurs moments sont égaux. Par conséquent, l'un équilibre l'autre. La force C tire directement. Sa ligne d'action CB est perpendiculaire au levier BA. La force E tire obliquement. Sa ligne d'action HB forme un angle aigu ou obtus ABH avec le levier. La distance de cette ligne HB du point d'appui A est AH. De plus AH est perpendiculaire à HB. Je prétends que le rapport des amplitudes des forces E/C est égal au rapport du BA/AH. La ligne AH est prolongée par une distance GA égale à BA. Une force I égale à C est appliquée en G. La ligne d'action GD de I est perpendiculaire à GA. Alors les forces C et I agissent avec les bras de levier égaux AB et l'AG et perpendiculairement à ces bras de levier, leurs moments sont égaux. Mais les moments de E et de C sont également égaux. Par conséquent, les moments des forces I et E sont égaux. Sur les échelles angulaires avec des bras égaux GAB le point d'appui étant en A, deux forces E et I avec des moments égaux sont alors appliqués. I tracte perpendiculaire. E est oblique, agissant dans une direction HB parallèle à GD (la force B étant enlevée ou neutralisée). En conséquence, comme nous l'avons montré dans le livre sur la force de la percussion, le rapport des amplitudes des forces E/I et le rapport des amplitudes des forces E/C sont égaux au rapport $AG/AH = AB/AH$.*³²⁴

³²⁴ De motu animalium. Chapitre VI, proposition XIII.

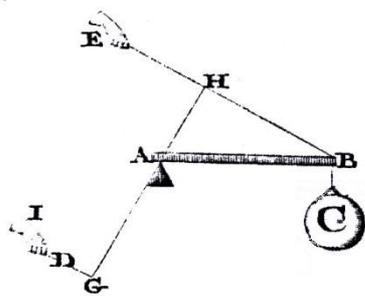


Figure 28. Deux forces opposées sont appliquées à l'extrémité d'un levier (Tab. II, Fig. 6).

C'est donc sur un énoncé ambigu en début de chapitre que Borelli se propose de déterminer la mesure de la puissance contractile maximale des fléchisseurs du membre supérieur. Il aborde ces calculs dans la proposition XXII depuis la position du bras en extension et en se fondant sur la théorie du levier. Il établit que le rapport des bras de levier de la puissance et de la résistance est de 1 à 20, plus précisément le poids soutenu correspond à des forces intrinsèques développées vingt fois supérieures aux niveaux du biceps et du brachial antérieur.

Cependant, cette conclusion présente une double erreur d'une part dans la fixation des bras de levier et d'autre part dans la mesure de leur longueur. Ainsi, pour évaluer l'action des deux muscles fléchisseurs cités, il place le membre supérieur entier en extension avec un poids suspendu à son extrémité. Or dans cette position c'est principalement le deltoïde qui intervient avec les muscles supérieurs de l'épaule. Par leurs contractions actives, ils soutiennent le poids suspendu tandis que le biceps et le brachial antérieur se trouvent distendus et relâchés.

Quant à l'évaluation numérique des bras de levier, elle se trouve également erronée, car Borelli affecte pour bras de levier aux biceps et brachial antérieur la distance moyenne qui sépare leurs insertions à l'avant-bras de l'axe du ginglyme articulaire huméro-ulna, et à la résistance la longueur entière du membre supérieur. En d'autres termes, il ne considère qu'un levier et calcule les forces relativement à deux points d'appui différents. De plus, l'exemple du biceps avec une division des points d'insertions d'origines et de terminaisons musculo-tendineuses ne facilite pas le calcul précis des forces.

Dans les autres propositions du chapitre VIII Borelli envisage les calculs des forces selon les différentes angulations de l'avant-bras sur le bras, mais aussi en fonction de la position de l'articulation scapulo-humérale avec la main se trouvant en position de supination ou de pronation. Cependant il ne fait pas de distinction entre l'angulation articulaire du coude (huméro-radiale, huméro-cubitale, radio-cubitale) et celles de l'insertion des terminaisons musculo-tendineuses du biceps ou du brachial antérieur.

De même, les analyses de Borelli ne supposent pas une décomposition possible de la force des fléchisseurs en composante de rotation et de coaptation. C'est-à-dire pour prendre l'exemple du biceps dans sa plus simple expression lorsque son tendon agit à angle droit sur le radius, toute la force du muscle déplace le segment de membre (l'avant-bras) autour du coude. Par contre, si le tendon agit à 45° par rapport à l'axe longitudinal du radius, une partie de la force déplace le segment vers le haut alors que l'autre le comprime légèrement vers le coude. En kinésiologie, la composante de rotation est celle qui déplace le membre alors que la composante de coaptation³²⁵ est celle qui comprime (ou quelquefois éloigne) les surfaces articulaires.

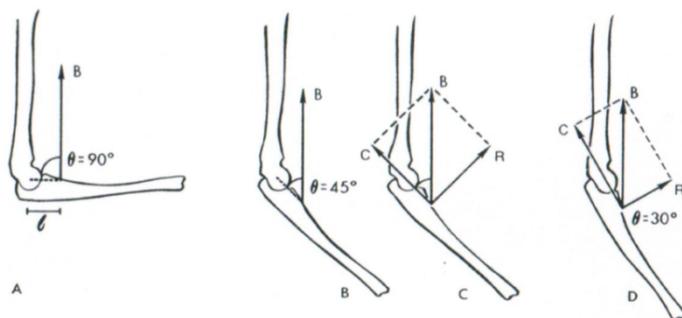


Figure 29. En A, où θ égale 90 degrés, \vec{B} correspond entièrement à la composante de rotation. En C et D, on peut voir les composantes rectangulaires du biceps tirant à 45 et 30 degrés par rapport à l'axe longitudinal de l'avant-bras. R et C représentent respectivement les composantes de rotation et de coaptation. R et C sont égales en C alors qu'en D, C est plus grande que R.³²⁶

Cette méthode de décomposition de la force se montre particulièrement intéressante pour répartir l'activité musculaire en ses deux composantes perpendiculaires : la composante de rotation perpendiculaire à l'axe mécanique du segment mobilisé qui engendre le mouvement et la composante longitudinale parallèle à l'axe mécanique qui témoigne de la pression ou de la traction exercée au niveau de l'articulation mobilisée. Si le muscle s'insère à 90° sur le segment osseux, toute la force musculaire sera utilisée pour engendrer le mouvement. Par contre selon l'angulation de l'insertion musculaire la force de contraction crée en partie le mouvement de rotation, mais une autre partie comprime les surfaces articulaires l'une contre l'autre.

Le vecteur B représentant la force de contraction exercée par le muscle inséré sur le segment osseux selon un angle θ peut se décomposer d'après la méthode du parallélogramme pour déterminer ainsi la composante de rotation (R) ainsi que la

³²⁵ La coaptation d'une articulation est le maintien du contact entre ses surfaces articulaires.

³²⁶ Williams M. *Biomécanique du mouvement humain. Une introduction.* [Traduction et adaptation de Drouin Bernard] Paris : Editions Vigot, 1986.

composante longitudinale (C). Si cette composante longitudinale comprime les surfaces articulaires l'une contre l'autre, elle est dite positive ou de pression ; si par contre elle tend à écarter les surfaces articulaires croisées par le muscle, elle est dite négative ou de traction.

2) Intérêts et limites de la démarche physico-mathématique borellienne

L'ouvrage de Borelli, quelque important qu'il soit, n'offre pas un traité complet d'anatomie et de physiologie fonctionnelle expliqué selon une démarche physico-mathématique. Les limites se font sentir très rapidement sur le plan des précisions anatomiques, l'auteur manque de détails dans les descriptions ne serait-ce que sur le plan de l'action de certains muscles sur les appareils locomoteurs, Félix Giraud-Teulon note dans son traité sur *l'Étude de la locomotion chez l'homme et les animaux vertébrés*³²⁷ ces imprécisions qui déjouent ensuite la justesse des calculs et des explications. Borelli est avant tout un mathématicien et un physicien qui applique en expérimentant sa logique sur des êtres vivants complexes qu'il maîtrise mal sur les aspects anatomiques et surtout physiologiques.

Borelli s'attache surtout à démontrer l'énorme désavantage qu'éprouvent les muscles dans leur action, en cela la science effectue un pas prodigieux. Quant aux attitudes et aux mouvements généraux, il s'en est occupé avec moins de succès. Plusieurs de ses descriptions sont inexactes, en effet toujours dans le chapitre X il développe des considérations qu'il pense bien au-dessous de la vérité en faisant plus que doubler l'étendue des bras de levier de la résistance dans ses ultimes évaluations : « *Puisque tous les muscles de l'animal, avec de rares exceptions, sont attachés à leurs deux extrémités et l'une de ces extrémités est habituellement fixe, en contractant ces muscles la Nature est forcée d'exercer une force égale à deux fois la résistance qu'elle doit surmonter. Le doublement des forces est de faible importance, considérant les énormes multiplications qui seront démontrées plus tard.* »³²⁸

Dans la proposition XXX Borelli calcule la valeur d'un muscle lors de sa contraction. La force qu'il développe peut-être assimilée à celle que mesurerait la tension d'une corde suspendant un poids donné. Voici l'exemple emprunté dans cette proposition : « *Les extrémités A et B d'une corde rigide ou souple et contractile AB sont tirées en directions opposées par deux forces ou deux charges R et S de telle manière qu'il y ait équilibre et que les forces soient égales au moment avec lequel la corde résiste à la tension, c.-à-d. qu'une force ne*

³²⁷ Giraud-Teulon Félix. *Principes de mécanique animale ou, Étude de la locomotion chez l'homme et les animaux vertébrés*. Paris : J.-B. Baillière et fils, 1858.

³²⁸ *De motu animalium*. Chapitre X, proposition XXXVI, commentaire.

*domine pas l'autre. J'affirme que les forces R et S sont égales et la somme des deux forces est égale à la force avec laquelle la corde résiste à la tension. S et R sont des charges et tirent la corde AB par deux poulies F et G. ».*³²⁹

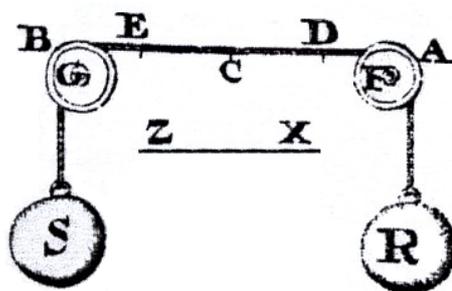


Figure 30. Si deux forces tirent suivant la même ligne droite les deux bouts d'une corde rigide (Tab. III, Fig. 7).

Mais cette déduction n'est pas vraie, car avec la fixation d'un des poids, les conditions de la corde ne seront pas changées, la tension de la corde est expressément mesurée par le poids même qu'il soutient. Ainsi l'ensemble des propositions s'appuyant sur ce principe faux se révélera imaginaire pour doubler les valeurs du biceps et du brachial antérieur. Sur un plan analytique souvent ses explications sont peu satisfaisantes et se heurtent à des critiques fortes qui démontrent irrémédiablement la fausseté des théories comme celle du saut (Chapitre XXI) ou d'instrumentalisations à l'image d'hypothétiques sous-marins (Proposition CCXXIV) ou scaphandriers (Proposition CCXXII) qui attirent l'attention des esprits scientifiques rigoureux et attentifs aux innovations.

L'ouvrage de Borelli se présente souvent obscur et difficile à entendre et des connaissances en mathématiques se révèlent indispensables pour élaborer des critiques constructives. Cependant, cette œuvre constitue une étape historique sur la représentation physiologique des problèmes de locomotion à la fin du XVII^e siècle. D'ailleurs les multiples interprétations des propositions du *De motu animalium* par les savants de l'époque dans *Le Journal des Scavants* ou les soixante-six occurrences borelliennes dans *l'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1751-1772) positionnent culturellement la valeur de ce travail pour indiquer :

« Qu'il n'y a personne dans le monde savant qui ne connaisse les Ouvrages de l'illustre M. Borelli sur le mouvement des animaux. En voici une nouvelle édition beaucoup plus correcte que toutes celles qui ont paru jusqu'à présent ; & on ne saurait savoir trop de grès à celui qui a travaillé avec tant de succès : car il en a ôté une infinité de fautes considérables, qui rendaient l'ouvrage obscur en plusieurs endroits. Le libraire a donné au commencement une petite liste de quelques-unes de ces fautes, laquelle n'en contient que la moindre partie, mais

³²⁹ *De motu animalium*. Chapitre X, proposition XXX.

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

elle sert toujours à faire voir l'application que l'Éditeur a apportée pour donner au public cet Ouvrage le plus parfait qu'il a été possible. Il est divisé, comme l'on sait, en deux parties. La première est des mouvements extérieurs des animaux, tels que sont les flexions & les extensions, la marche, le vol ; & dans les poissons, l'action de nager. M. Borelli y fait voir la mécanique des muscles, & la force avec laquelle les parties sont leurs mouvements. Il parle de la puissance répandue dans les nerfs, par laquelle les muscles reçoivent leur action. La seconde partie est des mouvements intérieurs, & de toutes les causes intérieures de l'action des animaux. L'auteur y traite de tous les mouvements indépendants de la volonté, tels que sont ceux du cœur, du sang, de la respiration, &c. Il y traite des esprits animaux, du suc nerveux, de la nécessité de boire & du manger, de ce qui fait la digestion, de la dépuration du chyle, de la transpiration, de la circulation, de la bile, du sommeil & de la veille, &c. Voilà tout ce que nous croyons devoir dire d'un ouvrage qui n'est inconnu à aucun Savant. »³³⁰

Le journal des savants, un des plus anciens périodiques littéraires et scientifiques d'Europe est tout à fait précieux pour faire revivre l'atmosphère scientifique de l'époque, les problèmes qui se posaient, la vie des idées. Plus de deux cents comptes rendus de livres de mathématiques montrent les préoccupations des savants du XVII^e siècle et les articles des meilleurs mathématiciens de France et d'Europe donnent un aperçu de la pensée mathématique. Mais les analyses les plus précises sur les travaux de Borelli apparaissent principalement dans l'ouvrage majeur du XVIII^e siècle édité sous la direction de Diderot et D'Alembert. Les occurrences majeures de Borelli concernent surtout les items sur le mouvement du cœur et de la respiration, la composition du mouvement, la position debout, la faculté vitale, la force des animaux, les mécaniciens, la structure des fibres musculaires, la progression des animaux, l'action de sauter, ainsi que sur le rôle spécifique des ailes et de la queue des oiseaux, des nageoires, des muscles fléchisseurs, mais aussi la curiosité des effets du poisson torpille³³¹...

Le traité *De motu animalium*, bien autrement important que tous ceux qui l'avaient précédé, obtint dès le premier moment, une faveur que le temps atténuera lentement. Il convient de relever que Borelli n'ayant pu veiller lui-même à l'édition de son livre, de nombreuses fautes d'impression s'y glissèrent. Ainsi les énoncés de plusieurs propositions se trouvèrent tout à fait vicieux. Outre ces fautes, qui ne doivent être imputées qu'aux éditeurs, on en trouve d'autres qui appartiennent évidemment à l'auteur, ce sont des erreurs graves sur des faits d'observation ou sur des principes de

³³⁰ Joh. Alphonsi Borelli Neapolitani Matheseos Professoris, de motu animalium, Editio novissima ab innumeris. medis & erroribus repurgata. Additæ sunt post finem Partis secundæ, Joh. Bernoulli Basil, Medic. Doct. Meditationes Mathematicæ, de motu musculorum. Lugduni Batavorum, apud Petrum Vander AA. 1710. C'est-à-dire : Les œuvres de Jean Alfonso Borelli sur le mouvement des animaux. Nouvelle Edition corrigée de plusieurs fautes qui étaient dans les autres. On y a joint sur la fin les Méditations Mathématiques de Jean Bernoulli sur le mouvement des muscles. A Leyde, chez Vander AA. 1710. Vol. in 4°. 236 p. Pour la première, & 314 p. Pour la seconde. In *Le journal des Sçavants*, 1711, p. 427-428.

³³¹ Les torpilles (Torpédiniformes) peuvent infliger de douloureuses décharges électriques. Il existe environ 35 espèces de raies qui présentent cette capacité. Elles possèdent deux organes électriques situés à l'avant du corps, qui peuvent foudroyer leur proie d'une décharge de 80 à 200 volts.

mécanique qu'il a employés, comme l'ont démontré surtout Antoine Parent et Pierre Varignon, mais aussi Henry Pemberton³³² et Geor Erhard Hamberger dont les études sont évoquées très rapidement par Paul-Joseph Barthez dans son ouvrage consacré à l'interprétation du *De motu animalium* et intitulé *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux* (Carcassonne, 1798).

Antoine Parent mathématicien et physicien français élu quelques mois avant sa mort, à l'académie des sciences de Paris a cherché à relever, certaines contradictions sur des principes que Borelli pensait concilier avec les faits, mais sa tentative n'a pas été suivie d'un grand succès.³³³ Parent a redressé et perfectionné en quelques points les propositions de Borelli, mais souvent sa critique porte à faux, il attaque des opinions que Borelli n'a point avancées et combat certaines erreurs que pour lui en substituer d'autres.

Pierre Varignon dans son examen de l'opinion de Borelli sur les propriétés des poids suspendus à des cordages, petite analyse qui fait suite à son *Projet d'une nouvelle Mécanique*³³⁴ propose tout en reconnaissant l'importance des travaux scientifiques de Borelli un argumentaire en faveur de Simon Stevin et de Pierre Hérigone pour réfuter l'attaque de Borelli contre leurs propositions d'équilibre dans les cordages.

Varigon géomètre, et aussi l'un des mathématiciens les plus célèbres de la fin du XVII^e siècle. Il s'est évertué surtout à généraliser principalement en mécanique l'étude des mouvements combinés par l'équilibre partout où il existe. La préoccupation qu'il évoque dans la préface du *Projet d'une nouvelle Mécanique* « *A l'ouverture du second Tome des Lettres de Monsieur Descartes, je tombai sur un endroit de la 24 où il dit « c'est une chose ridicule, que de vouloir employer la raison du Levier dans la poulie. » Cette réflexion m'en fit faire une autre : Sçavoir s'il est plus raisonnable de s'imaginer un levier dans un poids qui est sur un plan incliné, que*

³³² *Cours de physiologie en vingt leçons*. Londres : 1773. [A course of physiology [Ressource électronique] : divided into twenty lectures, formerly given by the late learned Doctor Henry Pemberton. [Farmington Hills, Mich] : Thomson Gale, 2005.

³³³ *Elémens de mécanique et de physique où, l'on donne géométriquement les principes du choc & des équilibres entre toutes sortes de corps avec l'explication naturelle des machines fondamentales par messieurs de l'Académie royale des sciences*. (Paris : F. & P. Delaulne, 1700) ; *Recherches de physique et de mathématiques* (Paris : chez Florentin Delaulne... et Jean Jombert... M.DCCV, 1705, [2 vol.] puis 2^e éd., en 1713 [3 vol.], intitulé *Essais et recherches de mathématique et de physique*. Nouvelle édition augmentée d'un troisième volume, & d'un tiers au moins en chacun des deux premiers. Troisième volume. Qui contient 32 mémoires de mathématique & de physique, dont un tiers environ ont été lus dans l'Académie royale des sciences. Des remarques & suppléments sur quelques auteurs illustres, des relations d'histoire naturelle, des expériences & des tables sur différens sujets ; avec des éclaircissemens & supplémens pour ce troisième volume, qui contiennent plusieurs choses nouvelles & considérables. Paris : chez Jean de Nully, rue Saint Jacques, à l'image Saint Pierre.

³³⁴ Varignon P. *Projet d'une nouvelle Mécanique avec Un Examen de l'opinion de M. Borelli, sur les propriétés des Poids suspendus par des Cordes*. Paris : Veuve d'Edme Martin, Jean Boudot, & Estienne Martin, 1687.

dans une poulie. »³³⁵ semble lui indiquer la voie : « Ce fut ce qui me fit résoudre à prendre le parti d'épier moi-même la nature, & d'essayer si en la suivant pas à pas, je ne pourrais point apercevoir comment elle s'y prend pour faire que deux puissances, soit égales, soit inégales, demeurent en équilibre. Enfin je m'appliquai à chercher l'équilibre lui-même dans sa source, ou pour mieux dire, dans sa génération »³³⁶. Mais ce qui s'avère fondamental par rapport à la démarche qu'il emprunte pour étudier l'équilibre de la composition des forces dans les machines simples c'est le principe qu'il constate « Lorsque deux puissances, ou deux poids, ou bien une puissance & un poids font équilibre, soit avec des cordes seulement, soit à l'aide de quelque poulie, de quelque surface, ou de quelque levier que ce soit ; ils font toujours entre eux en raison réciproque des sinus de ces mêmes angles »³³⁷. L'analyse historique et épistémologique des tentatives des prédécesseurs à résoudre des systèmes mécaniques où interagissent plusieurs forces le conduit à la rédaction fondamentale du Lemme III « Si le point *A* sans pesanteur est poussé en même temps, & uniformément par deux puissances *E* & *F* suivant les lignes *AC* & *AB*, qui fassent entre-elles quelque angle *CAB* que ce soit, & que la force dont agit la puissance *E*, soit à celle dont agit la puissance *F*, comme *AC* à *AB*. Ce point *A* suivra la Diagonale *AD* du parallélogramme *BC* fait sous ces deux lignes »³³⁸

Les éléments du théorème fondamental de la composition des forces, c'est-à-dire de la règle du parallélogramme conditionne l'analyse de l'ensemble du petit traité consacré à l'*Examen de l'opinion de M. Borelli, sur les propriétés des poids suspendus par des cordes*. Varignon consacre trente et une pages et onze figures à la fin de son livre.

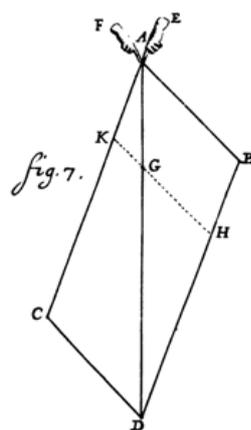


Figure 31. Parallélogramme des forces du Lemme III.

³³⁵ *ibid.*, préface.

³³⁶ *ibid.*, préface.

³³⁷ *ibid.*, préface.

³³⁸ *ibid.*, p. 6.

La technique du parallélogramme est issue d'une longue tradition dont la paternité réelle se confond dans l'histoire de la statique ou science de l'équilibre des forces. En effet Galilée avait clairement énoncé le principe de la composition du mouvement acquis par un corps et de celui qu'une force intervenante lui aurait communiqué à partir du repos. Stevin avait entrevu la règle de la composition des forces concourantes. Mais c'est à Varignon qu'est dû le premier énoncé clair de cette loi, sous sa forme qui lui a été conservée, ainsi que la théorie des moments pour les forces concourantes.

Borelli dans sa recherche sur les forces des muscles rayonnés, composés de plusieurs muscles penniformes, a démontré que, si plusieurs puissances sont en équilibre avec un poids qu'elles tirent obliquement par autant de cordes, en sorte que le point de concours de ces cordes soit mobile suivant la direction de la résistance, ces puissances seront à la résistance, comme les longueurs de corde qui leur sont proportionnées, sont à leurs sublimités³³⁹.

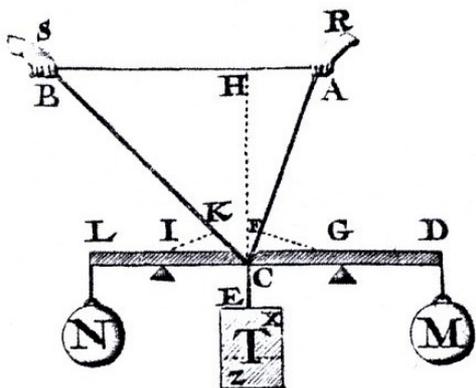


Fig. 5

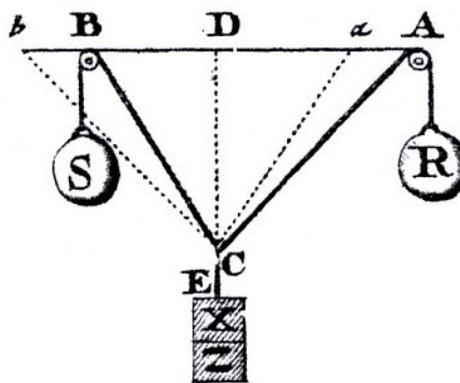


Fig. 6

Figure 32. Représentation des Figures 5 et 6 de la table VII de la proposition LXVIII du chapitre XIII sur les lemmes nécessaires pour analyser la puissance motrice des muscles dont les fibres ne sont pas parallèles et tirent obliquement.

Dans la proposition 68, la configuration de l'application des forces (R, S) agissant sur un même point C constitue un système de forces concourantes. Dans l'étude de ce système de forces concourantes qui contribuent à l'équilibre de la masse T, les règles de la statique s'appliquent à résoudre deux principaux problèmes. À savoir d'une part la simplification du système des forces concourantes et d'autre part les conditions qui permettent l'équilibre du système. Le système des forces concourantes peut se ramener à la détermination d'une seule force résultante dont la grandeur et la direction se déterminent selon la règle de l'addition des

³³⁹ Qualité de ce qui est placé en haut.

vecteurs qui s'obtient par la règle du parallélogramme et notamment la règle du polygone des forces.

La composition de l'ensemble des forces se réalise en transposant les forces successivement les unes à la suite des autres, afin que l'extrémité de chaque vecteur soit l'origine du suivant. Le vecteur qui relie l'origine du premier vecteur à l'extrémité du dernier représente la résultante des forces données.

Le point C est relié par 3 cordes à une masse T par le point E et 2 forces R et S depuis les fixations respectives R et S. Que cette masse soit supportée avec ces 2 forces selon des points de tractions dont le cheminement des cordes passe ou pas après des poulies cela ne change pas l'intensité des forces R et S et du poids T, mais simplement la direction des cordes de suspension. Dans la proposition 68 le point C est donc soumis à 3 forces R, S et T dont les tractions sont déterminées selon les orientations des cordages de suspension. Quand le système se trouve en équilibre, la somme vectorielle $R+S+T$ est nulle. Si la valeur de la masse T change ou l'intensité de la traction de l'une des forces R ou S varie l'équilibre se rompt et le point C se déplace vers une nouvelle position d'équilibre, si la condition le permet.

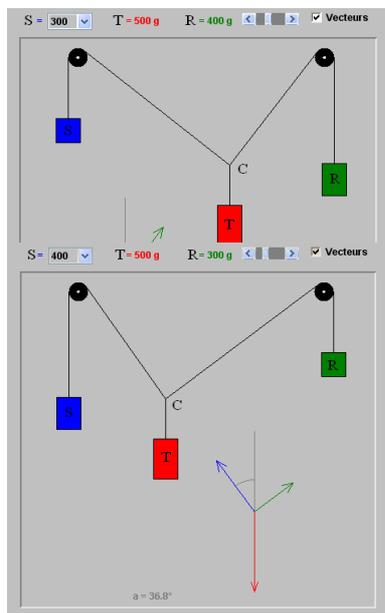


Figure 33. Équilibre d'un système de forces concourantes.

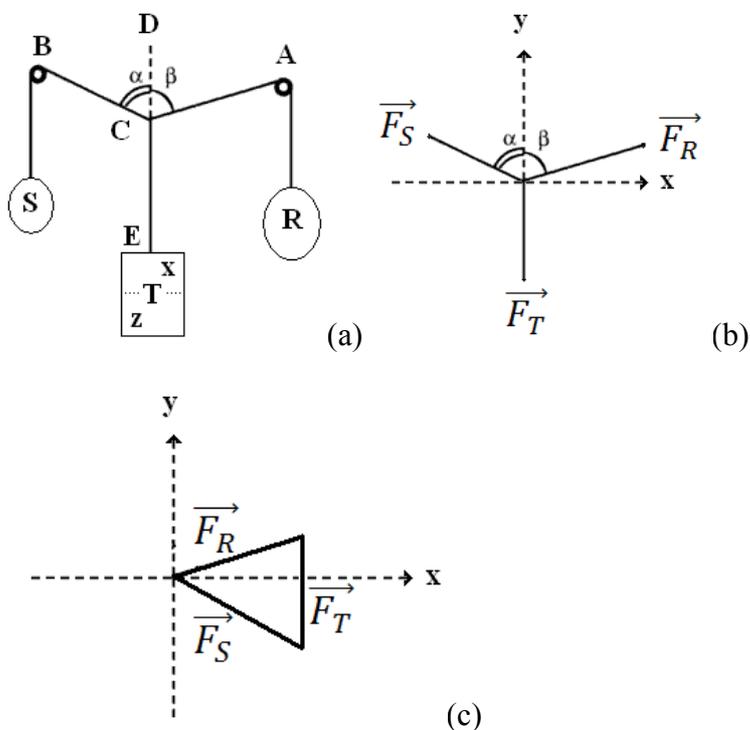


Figure 34. Représentation du système à trois forces concourantes (a) sa simplification et sa projection sur un repère (b).

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

L'étude critique de 28 pages de Pierre Varignon intitulée *l'Examen de l'opinion de M. Borelli, sur les propriétés des poids suspendus par des cordes* extraite des écrits de l'ouvrage intitulé *Projet d'une nouvelle Mécanique* paru en 1687 est très riche sur le plan de l'histoire des sciences physico-mathématiques. (Polygone et parallélogramme des forces)

Cette critique de la proposition 68 de Borelli introduit une analyse spécifique sur le raisonnement physico-mathématique de l'auteur qui essaye de se démarquer présomptueusement des travaux surtout d'Hérigone, de Stévin et quelques autres. L'analyse de Varignon a toute son importance, car elle peut remettre en question tout le raisonnement échafaudé par Borelli pour expliquer la puissance motrice des muscles dont les fibres musculaires ne sont pas parallèles et tirent obliquement. En effet, les autres propositions du chapitre XIII, dépendent de la logique développée.

Aujourd'hui on sait qu'un système ou un solide soumis à l'action de trois forces extérieures non parallèles, est en équilibre, si la résultante des trois forces est nulle et les trois forces sont concourantes en un point.

À l'équilibre : $\sum F_x = 0$ et $\sum F_y = 0$

En projetant les forces \vec{F}_R , \vec{F}_S et \vec{F}_T sur les axes orientés du repère (x, y) on obtient :

$$\sum F_x = F_R - F_S \text{ et } \sum F_y = -F_T + F_R + F_S = -T.g + F_R + F_S$$

Sur l'axe x : $S \sin \alpha = R \sin \beta$

Sur l'axe y : $T.g = R.g \cos \beta + S.g \cos \alpha$

Si les masses R, S et T sont connues, le système correspond à deux équations à deux inconnues :

D'où :

$$\sin \alpha = \frac{R}{S} \sin \beta$$

$$S \cos \alpha = T - R \cos \beta$$

Avec les deux équations au carré :

$$\sin^2 \alpha = \frac{R^2}{S^2} \sin^2 \beta$$

$$\cos^2 \alpha = \left(\frac{T - R \cos \beta}{S} \right)^2$$

On sait selon la trigonométrie que : $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$

Donc :

$$\frac{R^2}{S^2} \sin^2 \beta + \left(\frac{T - R \cos \beta}{S} \right)^2 = 1$$

$$R^2 \sin^2 \beta + T^2 + R^2 \cos^2 \beta - 2 T R \cos \beta = S^2$$

$$R^2 (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) + T^2 - 2 T R \cos \beta = S^2$$

$$R^2 + T^2 - 2 T R \cos \beta = S^2$$

$$\text{D'où } \cos \beta = \frac{R^2 + T^2 - S^2}{2 T R}$$

$$\text{De la même manière } \cos \alpha = \frac{T^2 + S^2 - R^2}{2 T S}$$

3) La cause mécano physiologique de la contraction musculaire

Malgré ses nombreuses erreurs, malgré sa diffusion et son obscurité, l'ouvrage de Borelli se trouve le plus important de tous ceux écrits sur ce sujet à la fin du XVII^e siècle. La parution de son œuvre suscita un vif enthousiasme par tout ce qu'il renferme de neuf notamment par l'importante observation du désavantage des puissances musculaires dans les mouvements. Si dans l'évaluation numérique qu'il en voulut faire, il tombe dans de considérables inexactitudes, ces successeurs lui doivent la démarche à suivre. Les connaissances imprécises acceptées de l'époque marquent d'imperfections son travail.

Ainsi il a fait de longs et inutiles travaux pour appliquer le calcul au mécanisme de la contraction musculaire produite par les esprits animaux dans la deuxième partie de son travail, mais c'est qu'alors, personne ne révoquait encore leur existence. Des observations inexactes avaient fait considérer les muscles comme formés par des assemblages de fibres poreuses, extensibles, et dont les cavités ne pouvaient augmenter de largeur qu'en diminuant de longueur. De nombreuses théories se sont heurtées faisant avancer la physiologie. Les uns pensaient que cette distension était causée par l'accumulation des esprits animaux, d'autres, par l'afflux du sang, occasionné d'abord par ces esprits agissant comme stimuli, d'autres, et Pierre Gassendi était de ce nombre, à adopter la nouvelle hypothèse introduite par les chimistes, mais avec différentes modifications.

Borelli croyait que le sang déposé dans les pores des fibres musculaires, entrait en fermentation par la présence des esprits animaux, qu'il se produisait alors une

expansion, qui, agissait latéralement contre les parois de ces pores. Ceci tendait à les écarter dans ce sens, ce qui ne pouvait se faire sans qu'elle les rapprochât dans le sens de la longueur des fibres, qui, ainsi, se trouvaient raccourcies. Il crut pouvoir calculer le rapport de cette force dilatante avec celle qui tend à allonger le muscle, au moyen du rhombe funiculaire, sollicité par des forces contraires appliquées dans la direction de ses deux diamètres. C'est ce qui a fait dire à ceux qui n'ont pas lu la seconde partie de son ouvrage, qu'il croyait la fibre musculaire formée d'une série de petits losanges.

Depuis Borelli, on imagina différentes autres hypothèses, auxquelles on appliqua aussi le calcul en le généralisant pour élaborer des modèles. Jean Bernoulli, écrivit, en 1742, un petit traité *De Motu musculorum*, où il prétend que les fibres musculaires ne diffèrent point des fibres tendineuses, avec lesquelles elles se continuent, et dont elles partagent la couleur, comme le montrent les notions répétées. Les premières seulement offrent à leur intérieur une texture plus lâche, qui permet au sang de les pénétrer. Ces fibres musculaires sont étranglées d'espace en espace par d'autres fibres transversales des mêmes que John Mayow regardait comme les seuls organes actifs de la contraction, et converties ainsi en une suite de petits ovoïdes, unis par l'extrémité de leur grand diamètre, et offrant à leur intérieur un tissu plus lâche et comme spongieux.

4) Les esprits animaux

Les savants qui précèdent et suivent Borelli se préoccupent davantage de trouver la cause mécanique de la contraction musculaire, que de chercher comment cette contraction, une fois admise comme fait, pouvaient résulter les divers mouvements et les diverses attitudes. Bien que le mouvement musculaire soit expliqué d'une manière nouvelle d'après les lois de la statique, la partie sur l'étiologie du mouvement musculaire, dont la cause prochaine était suivant Borelli le gonflement du muscle, résultant de l'effervescence du fluide nerveux avec le sang se révèle purement hypothétique. En effet, avant de traiter du mouvement du Cœur il consacre de longs propos sur les muscles. Il propose les nombreuses manières dont la contraction des muscles peut se faire, après avoir réfuté quelques hypothèses sur la cause de leur mouvement, il conclut selon les hypothèses de Willis que cette cause n'est autre que la fermentation qui se fait au dedans des fibres charnues entre les esprits animaux et le sang. Il prétend que dans cette fermentation les liqueurs agitées s'insinuent au dedans des fibres charnues au dedans des petites chaînes qui composent les fibres charnues, et forment comme autant de petits coins qui produisent dans les fibres la tension, la dureté

et la contraction. À peu près de la même manière que les particules d'eau qui s'insinuent dans une corde qu'on a mouillée, la gonflent et la resserrent de telle sorte, qu'elle peut élever des poids considérables. Cependant son hypothèse diffère de Willis qui fait venir les esprits des tendons dans les fibres charnues.

Les muscles extérieurs concourent à un même mouvement, ou déterminent des mouvements opposés, de là leur distinction en congénères et antagonistes. En outre, l'espèce de mouvement qu'ils impriment leur a fait donner les noms de fléchisseurs, extenseurs, supinateurs, pronateurs, élevateurs, abaisseurs, etc. Dans toutes les parties du corps à peu près, les muscles affectés à un mouvement déterminé sont plus forts que ceux qui produisent le mouvement opposé. En général, ceux du tronc n'offrent pas une différence sensible des deux côtés, tandis qu'elle est très prononcée entre les fléchisseurs et les extenseurs. Borelli pensait que l'antagonisme des premiers et des seconds dépendait de leurs longueurs respectives, et conséquemment de leur tension, et que, leur force de contraction étant égale, les fléchisseurs, qui sont plus courts que les extenseurs, causaient nécessairement la flexion : qu'ainsi ces derniers n'avaient pas l'avantage.

Cette opinion a été réfutée, les critiques notamment François-Désiré Roulin³⁴⁰ faisant remarquer qu'il faut chercher la prédominance dans la longueur des muscles et le nombre de leurs fibres, par conséquent dans leur volume, dans leur disposition relativement aux leviers qu'ils doivent mouvoir, dans l'attitude la plus habituelle de certaines parties dans le repos, le sommeil, la paralysie et le tétanos, pense, d'après ces diverses considérations, que dans le tronc les extenseurs sont prépondérants ; que ce sont les élevateurs, les fléchisseurs aux membres supérieurs en général, les pronateurs à l'avant-bras, les extenseurs aux membres inférieurs, et les adducteurs au pied.

Pour pénétrer la connaissance de la contraction musculaire, de nombreux auteurs se sont intéressés à l'histologie en se préoccupant de la réaction de l'élément primitif responsable de la contraction à savoir la fibre, mais aussi des esprits animaux. Les opinions les plus variées ont été émises à ce sujet ; mais, à mesure que les instruments d'observation se perfectionnaient, les théories s'accordaient mieux entre elles et donnaient une explication satisfaisante du phénomène.

³⁴⁰ Roulin F.-D. Médecin ayant suivi particulièrement les leçons de physiologie de François Magendie et de zoologie de Georges Cuvier, sa thèse de Paris du 29 janvier 1820, intitulée *Propositions sur les mouvements et les attitudes de l'homme* est une synthèse intéressante sur les conceptions théoriques sur les postures, les attitudes et les mouvements locomoteurs chez l'homme.

Des démarches expérimentales seront multipliées pour prouver entre autres dans la locomotion que les esprits animaux dont on parle tant, n'ont aucune existence. Les esprits animaux pour certains sont une liqueur fine et subtile qui se forme dans le cerveau, passe dans les nerfs, d'où elle se distribue à toutes les parties du corps, ce qui lui a fait donner le nom de suc nerveux ; or ce suc nerveux est une chimère à ce que prétend Bidloo³⁴¹. Tel sera le dessein de cet auteur qui pour le prouver rapporte diverses expériences d'anatomie et de physiologie qui laissent déjà pressentir l'élaboration des théories sur l'influx nerveux :

Première expérience. Si on lie fortement à un chien les nerfs de la cuisse, il ne se fera dans les nerfs aucune tumeur, ni au-dessus ni au-dessous de la ligature ; au lieu que les artères dont les membranes des nerfs seront parsemées, paraîtront gonflées au-dessus de la ligature : si deux heures après on ôte le lien, alors les nerfs & les artères reprendront leurs fonctions comme auparavant. Or s'il coulait dans les nerfs un suc qui se porte aux parties, ces nerfs ne pourraient être liés sans souffrir un gonflement quelque part. Mais ce qu'il y a ici de remarquable, c'est que ces mêmes nerfs étant coupés, ne rendent aucun suc, non pas même en les pressant le plus fort qu'on peut. Si on y fait quelques incisions, fait en long ou en travers, il n'en sort pas seulement de quoi mouiller la pointe du scalpel, ou de quoi tacher un petit morceau de papier gris : & si on pique ou qu'on perce le nerf avec une aiguille brûlante, la croûte qui se fait à l'endroit brûlé tombe ensuite sans laisser aucun vestige de suintement.

Seconde expérience. Si on lie un nerf à quelque chien, dans l'endroit où le nerf se trouve sans ramification, & qu'on fasse deux ligatures à quelque distance l'une de l'autre, qu'ensuite on retranche la portion liée, & qu'on la mette dans la machine pneumatique après en avoir pompé l'air, cette portion ne deviendra ni plus grosse ni plus longue qu'elle était ; au lieu que les membranes qui les enveloppent paraîtront s'étendre en quelques endroits.

Troisième expérience. Qu'on examine avec le microscope tels nerfs qu'on voudra, on ne découvrira jamais ni tuyaux, ni cavités, ni interstices. Les nerfs, disent ordinairement les anatomistes, sont composés de plusieurs fibres qui viennent toutes des glandes de la substance corticale du cerveau & du cervelet, & qui étant unies ensemble sont la moelle allongée dans le cerveau, & la moelle de l'épine dans les vertèbres. Pour connaître parfaitement la structure des nerfs, disent-ils, il faut donc y considérer deux choses : premièrement, la moelle ou substance intérieure qui s'étend en forme de filets depuis le corps cortical dont on vient de parler, jusqu'aux extrémités des membres : & en second lieu, les membranes qui environnent les petits filets, & qui composent des tuyaux dans lesquels ces petits filets sont enfermés, enveloppes qui se distinguent, quoi qu'avec peine, dans les gros cordons, mais qu'il faut imaginer dans les autres qu'on ne peut diviser qu'en de longs filets, sans y remarquer de substance qui soit plus spongieuse au-dedans que vers la surface. Cela supposé, ils disent que les esprits animaux sont portés par ces tuyaux depuis le cervelet & la moelle de l'épine jusqu'aux muscles, en sorte que les filets tendus par le cours continuel de ce liquide spiritueux qui remplit leurs pores, ne peuvent être touchés sans transmettre leur mouvement à cette partie du cerveau & de la moelle de l'épine, d'où sortent immédiatement les nerfs, & dont les divers ébranlements sont ce qu'on nomme le sentiment : ils n'ont pas plus de peine à expliquer par les esprits animaux le mouvement des muscles, & pour rendre leur supposition plus vraisemblable, ils se servent de la comparaison suivante : nos yeux ne nous font point découvrir de cavité dans les nerfs comme dans les artères & dans les veines ; mais de même que dans le tronc d'un arbre où nous ne voyons point de conduits par où la sève soit portée, il ne laisse pas d'y en avoir, de même dans les nerfs, où nous ne saurions apercevoir de tuyaux par où l'esprit animal soit porté, nous ne devons pas laisser d'y en reconnaître.

[...] D'ailleurs, si les nerfs ne sont point creux, il faut bien absolument que le mouvement des parties se fasse sans le secours de ce suc nerveux, qu'on appelle vulgairement l'esprit animal. Ce qui a donné lieu au système des esprits animaux pour le mouvement des parties, c'est le rapport qu'en plusieurs occasions ce mouvement paraît avoir avec le cerveau ; car si la volonté a déterminé par exemple de mouvoir ou le bras, ou la tête ou le pied, &c. en même temps les muscles obéissent. Ce qui ne peut se comprendre, dit-on, si l'on suppose que les esprits animaux aillent du cerveau dans les nerfs, & se distribuent par cette voie selon les besoins. Les nerfs, dit-on, sont autant de canaux pleins du suc animal, & toujours prêts à le verser par leurs extrémités dans les muscles, où vont aboutir ; en force que lorsque la volonté s'est déterminée sur le mouvement de quelques parties, il se fait

³⁴¹ Bidloo G. *Exercitationum Anatomico-Chirurgicarum Decades duæ. Lugduni Batavorum apud Jordanum Luchtmanus*, 1708. [C'est-à-dire : *Dissertations anatomiques & chirurgiques, de Godefroy Bidloo, divisées en deux Décades.*] Leiden : chez Jourdain Luchtmanus, 1708, p. 216. 1709, p. 351-356.

une compression des fibres du cerveau sur l'extrémité du nerf, laquelle pousse le suc animal, & l'oblige à sortir par l'autre extrémité, qui se termine au muscle. M. Bidloo rejette absolument ce système, & prétend que les esprits animaux ne sont pas plus recevables en bonne Physique, que les qualités occultes des Anciens, & leurs atomes : mais comme son opinion est opposée à l'opinion commune des Savants, il dit qu'il attend là-dessus leur jugement, pour savoir s'il est dans l'erreur ou non.

5) Les hypothèses vitalistes de Paul-Joseph Barthez

Barthez publia en 1798, son livre sur le *Mécanisme des mouvements de l'homme et des animaux* ouvrage qui ne semble composé que pour y faire le fastueux étalage d'une érudition déplacée. Barthez semble souvent injuste envers les auteurs qu'il combat, peut-être cela vient-il de ce qu'il les a quelquefois mal compris, quoi qu'il en soit, si on jugeait quelques-uns d'entre eux, et Borelli en particulier, d'après ce qu'il en dit dans son avant-propos, on en prendrait une opinion très fautive. Il reste constant, pour ceux qui ont lu les deux ouvrages, que le dernier est loin de pouvoir faire oublier l'autre.

À la fin du XVIII^e siècle, Paul-Joseph Barthez, reprend la question telle que l'avaient posée Perrault, Borelli et Fabrice, après Aristote dans son ouvrage *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*. Comme le souligne l'un des contributeurs majeurs de l'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, pour laquelle il rédige de nombreux articles sur la médecine et l'anatomie. Le médecin vitaliste dans son discours préliminaire de son édition note : « *Entre les phénomènes qui animent et embellissent le spectacle de la Nature, il n'en est pas de plus intéressant que les mouvemens de l'Homme et des divers Animaux, sur Terre, dans les Eaux, et dans l'Air. Les mouvemens progressifs de l'Homme et des Animaux peuvent être considérés, et dans le principe de vie qui est le moteur de leurs organes ; et dans les causes prochaines et mécaniques de chacun de ces mouvemens.* »

En sa qualité de vitaliste, Barthez considère le principe vital comme premier moteur des organes ; et dans un discours préliminaire, il essaie de résumer sa théorie personnelle sur ce principe essentiel, qui est « *en dehors de toute matière* », sur ses forces et ses fonctions. Selon Barthez, les lois du principe vital dépendent de la nature universelle et sont absolument étrangères aux lois connues de la mécanique, de l'hydraulique, de la physique et de la chimie. Mais Barthez se hâte d'ajouter « *que ces lois ne sont pas moins étrangères aux facultés de liberté et de prévoyance, qu'on regarde généralement comme étant caractéristiques de l'âme pensante* ». Par une contradiction assez singulière, il reconnaît que les organes des animaux et de l'homme sont admirablement conformés, et que les affections de l'âme ont une certaine influence sur les affections du corps, puis dans une phrase imprécise, il déclare que « *ce qu'il importe surtout de connaître le plus possible dans l'homme vivant, c'est l'Être sympathique, qui, obéissant à ses lois primordiales, fait se correspondre*

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

entre elles, et les forces qui signifient toutes les parties de son corps et les facultés de son âme pensante ».

Cette théorie dogmatique sans fondement laisse sa place aux considérations « *des causes prochaines et mécaniques* » des mouvements que Barthez se propose de découvrir. Ce sujet lui semble entièrement neuf, même après le fameux ouvrage de Borelli, qu'il critique vivement, en y trouvant d'ailleurs des vues de détails ingénieuses. Il critique tous ceux qui ont écrit sur cette matière, ou ont exprimé une opinion sur les causes du mouvement, Gassendi, Descartes, Willis, Mayow, Parent, Haller et rappelle que les erreurs mathématiques de Borelli ont été réfutées par un grand nombre de mathématiciens, à la tête desquels il nomme Varignon.

Barthez en conclut que toutes les explications données jusqu'à lui sont vaines et vagues ; et se flatte que ses théories personnelles soient véritables. Aussi, tient-il à constater comment il les a conçues. Il nous rappelle donc que Chirac, le médecin de Louis XV, avait fondé deux chaires à l'école de Montpellier : l'une d'anatomie comparée ; l'autre, pour l'explication de l'ouvrage de Borelli. Ce dernier cours avait été négligé ; et Barthez, chancelier de l'Université de Médecine, avait cru devoir réparer ce regrettable oubli, en se chargeant lui-même de commenter les idées de Borelli. De là, le livre qu'il se décide à publier, « *malgré des circonstances défavorables et le dérangement de santé* ».

L'ouvrage se divise en six parties, où l'auteur traite successivement de la station chez l'homme, le singe et l'oiseau, des diverses espèces de sauts, des mouvements progressifs de l'homme, des mouvements progressifs des quadrupèdes, du ramper des chenilles et des serpents, du nager des poissons, sans oublier le nager des quadrupèdes et de l'homme ; et enfin, dans la sixième et dernière partie, du vol des oiseaux. Dans toutes ces études, Barthez montre de grandes connaissances d'anatomie et de physiologie. Il a en outre une érudition étendue, et cite souvent ses prédécesseurs, pour les réfuter souvent trop épris de ses propres pensées. Ses prétentions excessives ne sont pas justifiées et il n'a pas résolu définitivement tous les problèmes, comme il l'espérait. Néanmoins, il a le mérite d'avoir poussé de minutieuses recherches plus loin que personne avant lui, faisant apparaître que la mécanique des animaux est beaucoup plus compliquée que pensée ordinairement, et qu'il y avait là matière aux analyses les plus prolongées et les plus ardues.

Si Barthez n'a pas clos la question, il l'a certainement agrandie par l'exemple d'hypothèses subtiles et de remarques originales. Barthez conclut tout son travail en

Partie II. Chapitre 3. Remarques et critiques spécifiques sur le *De motu animalium*

revenant à sa théorie favorite du vitalisme, et en déclarant « *que les facultés automatiques, que le principe de vie exerce dans des organes qui lui sont inconnus, opèrent d'une manière si transcendante que l'intelligence humaine ne peut parvenir qu'à en voir quelques effets, dont elle doit renoncer à découvrir les causes premières.* » La conclusion est modeste ; mais elle peut sembler assez timide, après les démonstrations d'Aristote sur les causes finales, et après l'adhésion unanime des plus grands esprits qui ont agité ces questions.

Conclusion (2)

La reformulation de la pensée scientifique au début du XVII^e siècle, résultat de la crise de la conception classique du monde à la Renaissance, a reçu sa plus claire expression en physiologie avec la proposition de modèles mécaniques pour expliquer le fonctionnement du corps humain.

La nouvelle École, baptisée iatromécanique ou iatrophysique, fut surtout encouragée par deux avancées spectaculaires. D'abord, au siècle précédent, André Vésale avait illustré avec force détails la merveilleuse et véritable organisation anatomique de la machine corporelle (1543). Plus proche de Borelli, William Harvey, après avoir examiné le mouvement du cœur avec l'acuité d'un ingénieur, démontra qu'il s'agissait d'un dispositif de pompage faisant circuler le sang à travers l'organisme tout entier (1628). La démarche expérimentale s'est accentuée sur l'étude du vivant pour appartenir au projet où « *le mécaniste et la mathématisation gouvernent désormais l'appréhension conjointe de la nature céleste et terrestre. Ils sont servis par de nouvelles méthodes centrées sur le couple ratio - experientia, le calcul et l'expérience : dès lors, calculer, mesurer, observer, déduire sont pratiqués de concert.* »³⁴²

C'est dans ce panorama expérimental propice, de plus, bien renforcé par l'œuvre du physicien et astronome Galilée, que Borelli fit à son tour irruption avec la description d'un univers rationnel capable d'opérer selon des lois purement mécaniques. Dans ce vaste système, même les animaux seraient des automates, leurs parties anatomiques pourraient se déplacer et exécuter leur fonction de façon coordonnée avec une parfaite précision, comme le font les pièces d'une horloge. Bien plus, le corps humain lui-même pourrait agir comme une machine par des processus à dévoiler. Il connaît et s'inspire peut-être des travaux de Descartes en les corrigeant comme depuis la proposition CCXXI de la première partie du *De motu animalium* concernant la présence d'un feu ou d'une fermentation, principes responsables de la pulsation du cœur. Borelli connaît sans doute de lui, les considérations à l'identiques des humains et des animaux selon une logique de fonctionnement « machinique », le propulsant peut-être sur des études approfondies de mécaniques locomotrices.

³⁴² Blay M., Halleux R. *La science classique, XVI^e-XVIII^e siècle : dictionnaire critique*. Paris : Flammarion, 1998.

Partie II. Conclusion

Après 1656, l'année de sa disposition de la chaire de mathématiques devenue vacante à l'université de Pise, sous l'influence du grand-duc Ferdinand se forma dans la ville de Florence une société des disciples de Galilée, qui cherchaient à développer sa philosophie, à cultiver la physique expérimentale, et à en faire l'application à la nature entière. Cette société, favorisée par Léopold, prince de Toscane, fut organisée régulièrement en 1657, et prit le nom d'Académie del cimento. Ce fut en son sein que Borelli, l'un des membres les plus actifs, exposa les premières tentatives faites pour unir les mathématiques et la physique expérimentale avec l'art de guérir, pour exposer ainsi les fondements de l'école iatromathématique.

Avec son célèbre ouvrage *De motu animalium* (1679) dédié à la reine Christine de Suède, il expérimente et formule sa doctrine iatromécanique du corps humain. Les muscles du squelette constituent un ensemble de leviers et de marteaux qui obéissent aux lois mathématiques, mécaniques ou statiques, tandis que la circulation du sang répond à celles de l'hydraulique. La digestion, par exemple, se représente comme une simple action mécanique de trituration, dont la phase initiale est la mastication.

La foi dans les mathématiques en tant qu'instrument idéal pour l'analyse du monde, incite Borelli à aborder les thèmes physiologiques du point de vue quantitatif qu'il applique à d'autres études scientifiques. Bien qu'il admette à la différence de Descartes que la source du mouvement est en dernière instance l'âme, Borelli analyse la marche et le saut des bipèdes et des quadrupèdes, le vol des oiseaux et la nage des poissons par l'intermédiaire d'analogies avec des mécanismes composés de leviers, de charnières, de pivots et de poulies. Les procédures de mesures des forces exercées sur les supports osseux l'incitent à envisager de calculer la puissance musculaire, mais il est plus habile mathématicien que fin anatomiste, une position instable qui le conduira à des imprécisions et même de flagrantes erreurs de calcul.

Borelli démontre expérimentalement que la contraction musculaire ne peut être due à l'infusion d'un esprit gazeux ; car on ne voit pas de bulle quand on pratique des coupures profondes dans les muscles d'animaux qui se débattent sous la douleur, tout en étant immergés dans l'eau. Il reconnaît, cependant, que, la cause immédiate de la contraction musculaire : pourrait être une violente ébullition causée par un processus de fermentation, comme l'assurait à peu près au même moment Thomas Willis.

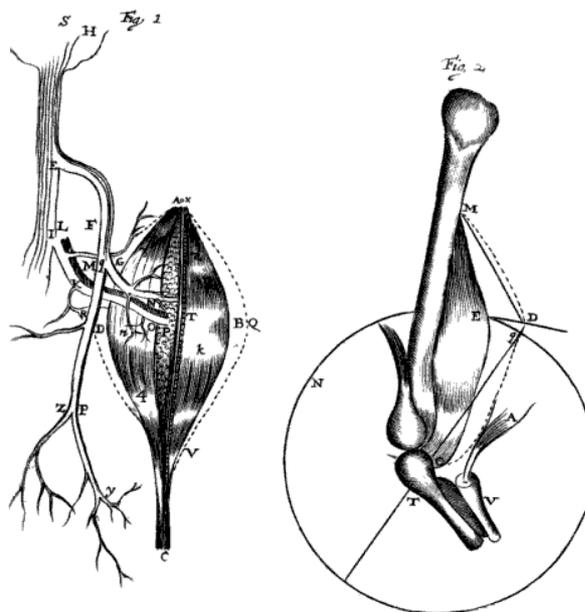


Figure 35. Représentation anatomique de la contraction musculaire révélant l'évolution des conceptions théoriques sur ce fonctionnement : l'analyse s'affine. Extrait de : Willis Thomas et Croone William *De ratione motus musculorum*. *In Opera Omnia* Genève : Apud Samuelem de Tournes, 1680.

D'autres savants d'obédience essentiellement iatromécanique, mais qui cependant adoptèrent quelques concepts iatrochimiques comme : William Croone, John Mayow et Johann Bernoulli changèrent progressivement cette opinion qui rapporte tous les problèmes aux lésions ou ruptures des parties solides dans l'économie.

L'idéologie iatromécanique franchit une étape plus radicale avec la physiologie solidiste³⁴³, doctrine dont les médecins rapportent toutes les maladies aux lésions des parties solides de l'économie proposée par Giorgio Baglivi, disciple de Marcello Malpighi qui fut lui-même un ami proche de Borelli. Grâce au microscope Baglivi confirma que toutes les parties solides du corps animal, des membranes les plus délicates jusqu'à l'os le plus dur, semblaient constituées de fibres disposées selon diverses configurations comme on le supposait depuis déjà un certain temps. Baglivi conclut donc que les fibres sont les micro-unités structurales d'un vaste système mécanique dans lequel les composants liquides ont seulement un rôle passif. D'autres savants ont essayé d'effectuer des calculs également de divers aspects de la locomotion, notamment James Keill. Pour apprécier la force musculaire, il calcula le nombre de fibres par ventre musculaire afin de déterminer, de ce fait, la quantité de tension développée dans chaque

³⁴³ Doctrine médicale désuète qui rapportait que toutes les maladies correspondaient à une modification des propriétés vitales des solides.

Partie II. Conclusion

muscle pendant le soulevé de charges. Cependant, il conclura incorrectement sur la longueur de contraction par rapport à leur longueur de repos.

Dans cette fin du XVII^e siècle, avec l'œuvre de Borelli, l'étude du mouvement se précise dans l'association et le transfert des connaissances des lois mécaniques à l'anatomie pour une meilleure compréhension du fonctionnement des corps vivants principalement par l'exercice de l'expérience, associée à la mesure et sa vérification. Ces deux disciplines essentielles, la mécanique et l'anatomie fonctionnelle, se complètent à cette époque pour une meilleure logique. Finalement, l'histoire des études des théories sur la locomotion concerne les avancées de chacune des sciences définissant cette activité. Sachant qu'une théorie selon son approche étymologique empruntée au grec (θεωρία, de θεωρεῖν) « *observer, contempler* » ou latine de *theoria* (et *theorice*) « *la spéculation, la recherche spéculative* » peut se définir comme un ensemble de notions, d'idées, de concepts abstraits appliqué à un domaine particulier. Pour être rigoureuse, elle se fonde sur l'observation des faits et l'étude approfondie des fonctions.

La théorie évoque ainsi la partie conjecturale de l'art. Elle diffère tout en étant constituée de la pratique qui se compose d'inductions tirées de faits. En ce sens, la connaissance de Borelli progresse principalement avec l'appui essentiel de l'expérience. Il élabore ses explications sur cet empirisme. Sur cette logique son « *activité scientifique peut être circonscrite par les trois pôles que constituent l'observation des faits, l'élaboration des concepts et l'exercice de la logique déductive* »³⁴⁴. Le premier de ces pôles relève de l'expérience, les deux autres de la théorie. Ces deux volets complémentaires constituent la démarche de ce savant, mais aussi de tout autre pour aborder les questions à résoudre dans le cadre d'une science de la nature. Les recherches expérimentales se sont démultipliées dans tous les secteurs scientifiques, afin de développer de manière exponentielle la démarche théorique, en particulier avec l'apport des mathématiques, qui a suivi ce mouvement selon un certain décalage. Ainsi, comme le souligne Hervé Le Guyader certaines phases de progression se dénotent pour identifier que : « *Les étapes du XVII^e et du XVIII^e siècle correspondent à la découverte de l'intérêt et des difficultés d'un langage de théorisation en biologie.* »³⁴⁵ Cette phase se prolonge au XIX^e siècle par l'élaboration de langages non formalisés en anatomie et en taxonomie où les divers critères de

³⁴⁴ Delattre P. Formalisation Concepts and Exploration Concepts. *Scientia*, 109, 459-481, 1974.

³⁴⁵ Le Guyader H. *Théories et histoire en biologie*. Paris : Vrin. 1988.

Partie II. Conclusion

justification émergent peu à peu et la recherche souvent vaine d'un formalisme mathématique est toujours présente.

Partie III : Bio-mécanique de la
locomotion : Marey, D'Arcy
Thompson, McNeill
Alexander, Bejan

Introduction (3)

Chaque espèce de mouvement exécuté par les animaux comme la marche, la course, le saut, la reptation, l'action de grimper, celle de fouir, de voler et de nager suppose un enchaînement de positions squelettiques particulières mobilisées par les muscles principalement. Pour certaines de ces postures et locomotions, il en est ainsi pour l'homme bipède.

Les tentatives de représentations de ces attitudes pour mieux comprendre la logique des enchaînements de ces actions se révèlent difficiles étant donnée la complexité de l'ensemble des coordinations qui interagissent. Les histoires de l'art du dessin, de la peinture, de la photographie, du cinéma expriment cette lente construction de l'apparence des mouvements et des locomotions comme support visuel explicatif de la description.

1) Des représentations pour mieux formaliser les mouvements

Certains proverbes aux origines lointaines soulignent qu'« *un dessin vaut mieux qu'un long discours* ». Ces formules langagières trouvent toute leur signification pour les artistes peintres, qui essayent de comprendre et de représenter les mouvements des corps vivants. Ils désirent maîtriser les savoirs sur les corps, sous forme de règles de proportions, de modèles anatomiques et de poses de références, pour se rapprocher le plus possible de la réalité visuelle apparente.³⁴⁶

Les efforts sont permanents depuis les premières éditions *De architectura* de Marcus Vitruvius Pollio dit Vitruve (1^{er} siècle av. J.-C), les traités *De pictura* (1435) et *De statua* (1450) de Leon Battista Alberti, les productions de Léonard de Vinci, les réalisations de Michel-Ange, les planches du traité des proportions d'Albrecht Dürer, celles du *De Humani corporis fabrica* d'André Vésale... En effet, pour décrire et quantifier les mouvements du corps, ils furent confrontés à des difficultés multiples liées à la nature des corps, à la perception correcte des coordinations des déplacements segmentaires, mais surtout, au manque de moyens techniques puis technologiques pour arrêter, fixer, les étapes de la décomposition du mouvement.

C'est après une longue période de plus de deux mille ans, où la description anatomique humaine et animale était prépondérante, mais limitée, car principalement

³⁴⁶ Comar P. *Figures du corps, une leçon d'anatomie à l'École des beaux-arts*. Paris : Editions beaux-arts, 2008.

Partie III. Introduction

centrée sur la représentation de positions et de stations ; que l'évolution rapide des sciences a conduit les savants à accéder à l'étude quantitative et mécanique des phénomènes, permettant ainsi, d'expliquer dans le détail les mouvements et les locomotions. La compréhension des enchaînements des postures est devenue plus rigoureuse avec la localisation détaillée des points d'appui, l'orientation et la quantification des forces, la mesure des déplacements précis des segments osseux, on pense bien sûr aux atouts de l'invention de la photographie (1839), celle de la chronophotographie (1889), puis du cinéma (1895).

En effet, l'étude de la locomotion nécessite une approche descriptive analytique de décomposition du mouvement. Position après position, étape après étape, phase après phase elle suit des points spécifiques de localisation sur les surfaces d'appuis, les positions segmentaires pour représenter les tractions ou les poussées déjà relevées et indiquées dans la première partie, moins de 300 ans av. J.-C., chez Aristote et d'anciens prédécesseurs, lors de mouvements spécifiques.

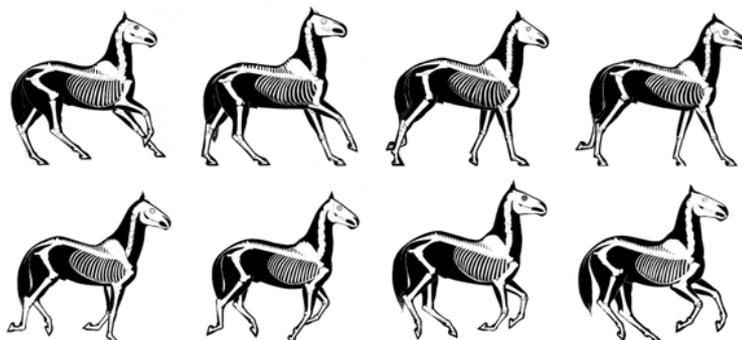


Figure 36. Cheval Lassalle. Galop à droite. Cliché n°15 fin du XIX^e siècle. Cinémathèque française. La série de dessins montrant le squelette d'un cheval en action représente un exemple de décomposition du mouvement. L'expérimentaliste physiologiste Étienne-Jules Marey³⁴⁷ étudie les chronophotographies en y joignant le mouvement des os souvent après dissection, pour montrer quels sont les muscles dont les actions sont synergiques ou antagonistes pour produire le mouvement ou le déplacement.

Par l'intermédiaire de ce découpage imagé, le déplacement du corps et les mouvements de ses parties constituantes peuvent être décrits dans leur enchaînement. Une modélisation sous forme de kinogrammes peut être éventuellement établie. Cependant, des prémices de représentations schématiques et mécaniques de découpages d'actions sont déjà présentes dans les chapitres XIX et XX consacrés à la bipédie et à la quadrupédie du *De motu animalium* de Borelli. Les propositions CLV, CLVI, CLXIV et

³⁴⁷ Dagognet F. *Étienne-Jules Marey : la passion de la trace*. Paris : Hazan, 1987.

CLXVI avec des figures respectives de support explicatif (Tab. XI, Fig. 11 ; Tab. XI, Fig. 12) mettent en évidence cette volonté ancestrale.

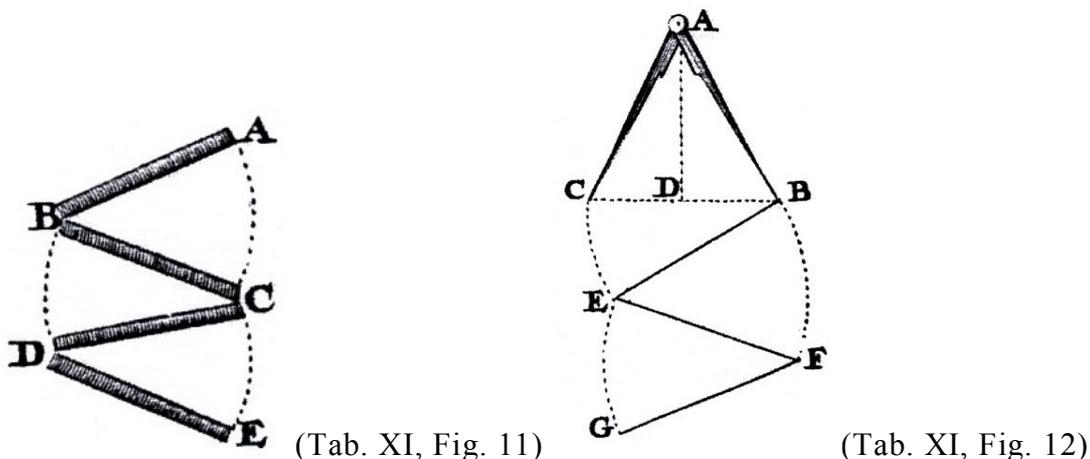


Figure 37. Différentes configurations du mouvement des segments inférieurs et des appuis lors de la marche chez Borelli. Il utilise la figure 11 de la table XI, pour argumenter que pendant la marche, le corps humain est toujours en contact avec le sol, soutenu alternativement par une jambe, puis l'autre. Il explique que pendant cet appui alternatif, chaque moitié de masse corporelle est élevée et déplacée. Elle est comme une colonne AB couchée et appuyée sur le sol avec son extrémité B et son extrémité A, qui pourrait être élevée et déplacée au-dessus de l'arc AC depuis le centre B. Dans un tel exemple, la force soulevant l'extrémité A de la colonne est égale à la moitié de la masse de la colonne. L'autre moitié est soutenue par le sol. Ensuite, la colonne étant en BC est déplacée depuis le centre C. Cette extrémité B est soulevée et déplacée au-dessus de l'arc BD vers CD par une force égale à la moitié de la masse de la colonne, et ainsi de suite. Avec la figure 12 de la table XI, il se sert de l'analogie de la marche au mouvement d'une paire de ciseaux BAC tenue érigée au-dessus d'un plan horizontal. En se tenant verticale, elle forme un triangle isocèle ABC. Leur ligne de gravité AD tombe exactement entre les deux jambes B et C. Après l'élévation de la jambe C du sol jusqu'à ce que la ligne de pesanteur AD coïncide avec la ligne de l'appui AB et soit perpendiculaire, par une rotation autour de l'axe AB, la jambe AC décrit une surface conique ACE. Puis, avec la jambe AC prenant l'appui à E, la paire de ciseaux est élevée encore jusqu'à ce que la jambe AE soit perpendiculaire et l'autre jambe AB tourne et décrit l'arc BF, et ainsi de suite. La paire de ciseaux est ainsi déplacée en alternant des élévations et des rotations alternatives. Effectivement, la progression avec cette déformation est inconfortable. Mais la Nature déplace le corps humain plus facilement et d'une manière élégante. Pendant la position, les jambes restant sur le sol forment certainement un triangle isocèle ABC. Alors la Nature effectue plusieurs mouvements circulaires simultanés qui permettent un déplacement vers l'avant. La jambe antérieure BA tourne autour du centre B dans un plan vertical.

C'est surtout au XIX^e siècle avec l'invention de la photographie et de la cinématographie que la méthode cinématique et la méthode cinétique prendront de la valeur pour mieux appréhender la compréhension du mouvement. C'est même en raison de l'intérêt porté à la locomotion, chez l'homme, comme chez l'animal, que les moyens instrumentaux de l'étude du mouvement ont commencé à se développer notamment avec les frères Ernst Heinrich, Wilhelm Eduard & Eduard Friedrich Wilhelm Weber³⁴⁸ qui furent les premiers à étudier la réduction de la longueur d'un muscle isolé et spécifique

³⁴⁸ Weber W. E., Weber E. *Mechanics of the human walking apparatus*. [Traduction de la version originale de 1825 *Mechanik der menschlichen gehwerkzeuge* par P. Maquet and R. Furlong (trans.). Berlin : Springer-Verlag, 1992.

Partie III. Introduction

pendant la contraction, tout en approfondissant le rôle des os comme des leviers mécaniques. Ils ont décrit dans le détail chronologique les mouvements du centre de gravité du corps en relation avec le calcul de ceux de ses segments respectifs. Ils reprennent dans un *aperçu historique des recherches anciennes sur la marche et la course*³⁴⁹ les travaux des prédécesseurs qui se sont intéressés à la locomotion comme Aristote et Galien, Fabrice d'Acquapendente, Gassendi, Haller, Barthez, Magendie, Roulin, Gerdy, mais aussi Borelli sur le centre de gravité. La filiation scientifique entre ces différents auteurs est présente.

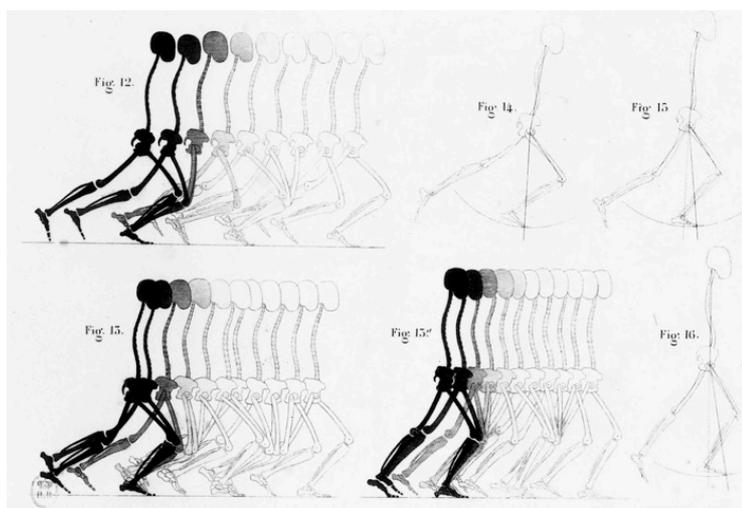


Figure 38. Squelettes animés, Wilhelm Eduard Weber (Extrait du *Traité de la mécanique des organes de la locomotion*, J.-P. Baillière, Paris, 1843).

Plus tard, les études de Christian Wilhelm Braüne et Otto Fischer lancent les toutes premières représentations mathématiques tridimensionnelles de la démarche humaine selon un protocole expérimental conservé encore à l'heure actuelle avec une prise en compte des masses et des volumes absolus et relatifs des segments, calculés sur des cadavres congelés. Enfin, « *Au cours des années 1870, l'évolution a permis de conjuguer les progrès effectués dans le domaine de la photographie instantanée et dans celui de la recherche théorique portant sur le mouvement. Cette convergence a fait naître l'idée de la représentation analytique du mouvement permettant une synthèse globale du phénomène* »³⁵⁰. Cette démarche fut initiée par Eadweard Muybridge principalement sur certaines catégories d'animaux et à un autre niveau avec Étienne-Jules Marey aidé de son collaborateur Georges Demeny sur les postures et les déplacements de l'homme entre autres.

³⁴⁹ Weber G., Weber E. *Traité de la mécanique des organes de la locomotion*. [Quatrième partie : *Aperçu historique des recherches anciennes sur la marche et la course*]. In Bischoff G.-T. et al. *Encyclopédie Anatomique, Tome II. Ostéologie, syndesmologie*. Paris : J.-B. Baillière, 1843, p. 492-518.

³⁵⁰ Vaillant A. *Corps en mouvement*. Saint-Etienne : Publié par l'Université de Saint-Etienne, 1996, p. 118.

Partie III. Introduction

En avant-propos de son livre *La Méthode graphique dans les sciences expérimentales* (1878), le physiologiste Étienne-Jules Marey écrivait en 1878 : « *La science a devant elle deux obstacles qui entravent sa marche ; c'est d'abord la défectuosité de nos sens pour découvrir les vérités, et puis l'insuffisance du langage pour exprimer et pour transmettre celles que nous avons acquises* ». C'est à cette période que l'étude du mouvement devint réellement une science. Les connaissances plus approfondies de l'anatomie et de la physiologie, le développement de la physique, spécialement de la mécanique rationnelle ainsi que l'application de nouvelles techniques d'investigation permettent des avancées très importantes.

Quelques années auparavant dans *La machine animale : locomotion terrestre et aérienne* (1873) Marey évoquait déjà la relation entre la perception des sens et les moyens de les retranscrire. À la fois savant et artiste, il analyse, invente et découvre les lois de la locomotion dans la minutie de la représentation visuelle du dessin, de la photographie et enfin de la cinématographie. En fait, dans cette démarche, le mouvement est fixé par la représentation d'enchaînement d'images. Cette partie évoque le progrès de l'étude du mouvement par l'émergence de nouvelles technologies couplées très rapidement à l'expérimentation, mais sous la récurrence des idées déjà présentes chez les anciens et notamment Borelli. Aux microscopes et télescopes, outils miracles d'aide à l'observation des siècles précédents, s'ajoutent des instruments d'enregistrement qui peuvent découper par stroboscopie le mouvement en images.

Finalement, les doctrines médicales iatrochimique et iatromécanique du XVII^e siècle s'associent plus intimement en bio-chimie et bio-mécanique au XIX^e siècle pour comprendre la source de la vie par la compréhension du mouvement des différents organes et appareils. En effet, les études sur les stations et les locomotions réalisées sur l'homme et les animaux montrent que la démarche aristotélicienne et borélienne sont présentes encore dans les concepts mécaniques, anatomiques et physiologiques de l'époque. Les notions se sont transformées, spécifiées, mais ont gardé toutes leurs significations ancestrales, évoquées ou suggérées : les points d'appui et les pressions, les répartitions des masses et les centres d'inertie et de gravité, les leviers et les forces, les flexions et les extensions, les repères d'espace et de temps, les forces et les résistances, les énergies et les puissances, les modèles physico-mathématiques sont perpétuels. Il y a toujours une réactualisation entre autres de la mécanique statique d'Archimède, intéressée par le principe du levier et la recherche de centre de gravité, développée dans son traité *De l'équilibre des figures planes*.

Partie III. Introduction

Ces notions usuelles et séculaires de la statique se trouvent quantifiées par les progrès des instruments d'acquisitions et d'enregistrements cinématiques et dynamiques. Principalement des valeurs de forces, de résistances et de puissances musculaires pendant le mouvement sont acquises. Il devient possible de mesurer l'efficacité d'un mouvement par l'intermédiaire de la trajectoire instantanée de l'évolution des centres de masses des segments, mais aussi du centre de gravité du corps lors de différentes progressions communes chez les animaux comme la marche, le saut, la course, le vol, la nage. Les mesures physiologiques et énergétiques s'ajoutent aussi quand les moyens le permettent. C'est ainsi que certaines propositions ou hypothèses anciennes furent soumises à l'épreuve de l'expérimentation. Ce fut le cas pour l'œuvre de Borelli, entre autres sur les caractéristiques de la constitution de la fibre musculaire, sa contraction, la localisation du centre de gravité chez l'homme et les animaux, ainsi que la plupart des postures et des déplacements des animaux et de l'homme.³⁵¹ Dans *La machine animale : locomotion terrestre et aérienne*³⁵², une œuvre reconnue pour sa valeur scientifique sur l'étude du mouvement, publiée en 1873, on localise encore, plus d'une dizaine d'occurrences sur les hypothèses et les théories de Borelli qui seront testées expérimentalement.

a. Commentaires de Marey sur les études de Borelli dans *La machine animale*.

p. VIII. « Il y a plus de deux cents ans que Borelli, étudiant la condition de stabilité et de déplacement des poissons, traçait le plan d'un navire plongeur construit sur le même principe que les formidables Monitors qui ont fait leur apparition dans la récente guerre d'Amérique. »

p. 3. « Guidée par l'expérimentation, la physiologie cherche et retrouve les forces physiques dans un grand nombre de phénomènes vitaux ; chaque jour voit s'accroître le nombre des cas auxquels on sait appliquer les lois ordinaires de la nature. Ce qui leur échappe reste pour nous l'inconnu, mais non plus l'impénétrable. Parmi les phénomènes de la vie, ceux qui nous sont intelligibles sont précisément d'ordre physique ou mécanique. »

p. 64-65. « Ceci nous conduit au cas du muscle qui se conforme rigoureusement aux lois générales dont nous venons de parler. Plus un muscle est gros, c'est-à-dire plus sa surface de section est étendue, plus il est susceptible d'un effort considérable. Mais, d'autre part, un muscle ne se raccourcit qu'en raison de sa propre longueur. On peut estimer qu'en moyenne, le raccourcissement du muscle en contraction, lorsqu'il n'est pas détaché de l'animal, est d'un tiers de sa longueur au repos. Il suit de là que le travail d'un muscle sera proportionnel, à la fois, à la longueur et à la section transversale de ce muscle, c'est-à-dire à son volume ou à son poids.

³⁵¹ (Notamment le chapitre XVIII^e intitulé « La position des animaux » et entre autres les propositions n° 131 à 143 sur la posture érigée et équilibrée de l'homme).

³⁵² Marey E.-J. *La machine animale : locomotion terrestre et aérienne*. Paris : Germer Baillière, 1873.

Partie III. Introduction

D'après cela, on peut, suivant les caractères anatomiques d'un muscle, savoir quelle est la force qu'il possède, relativement à celle des autres muscles du même animal, et quelle est la forme sous laquelle il effectue son travail. La substance des muscles, c'est-à-dire la chair rouge, présente sensiblement la même densité dans les différents points de l'économie, ce qui fait que la pesée est la plus exacte et la plus expéditive des manières d'estimer l'importance relative de deux masses musculaires et de prévoir les quantités de travail qu'elles sont capables d'exécuter.

Quant à la forme sous laquelle doit se produire le travail musculaire, elle se déduit non moins facilement de la forme du muscle. S'il est gros et court, il devra produire un grand effort multiplié par un faible parcours ; s'il est long et grêle, il aura un parcours très étendu, mais ne développera qu'un effort peu énergique.

Les exemples abondent à l'appui de cette loi qui règle le travail musculaire. Le sterno-mastoiïdien, le couturier, le grand droit de l'abdomen sont des muscles à long parcours, autrement dit à longue étendue de mouvement ; ils ont, à cet effet, une portion charnue d'une très grande longueur. Le grand pectoral, le grand fessier, le temporal, sont des muscles gros et courts, c'est-à-dire capables d'un effort considérable, mais d'un faible raccourcissement.

Borelli connaissait déjà ces lois anatomiques de la puissance musculaire ; sans faire intervenir la notion de travail qui n'était pas introduite de son temps en mécanique, il distinguait très bien ces deux caractères opposés de l'action d'un muscle selon que son volume ou sa longueur l'emporte. Et comme il faut toujours une théorie pour satisfaire l'esprit, l'auteur cherchait à interpréter ces effets différents par une théorie de la structure des muscles.

Qu'on se figure, disait-il, une chaînette de métal, formée d'anneaux circulaires élastiques et que sur cette chaînette on exerce une traction. Chaque anneau se déformera pour prendre une forme ovalaire et la chaînette entière s'allongera en raison du nombre de ses anneaux, c'est-à-dire en raison de sa longueur. En revenant sur elle-même, sous l'influence de l'élasticité, cette chaînette se raccourcira également d'une quantité proportionnelle à sa longueur. La chaînette de Borelli, c'est la fibre primitive que le microscope révèle dans tous les muscles de la vie animale.

Mais, dit Borelli, si l'on forme un faisceau avec un grand nombre de ces chaînettes, chacune d'elles résistera à la traction en raison de l'élasticité de ses anneaux ; la résistance totale sera proportionnelle au nombre de chaînettes, c'est-à-dire à la grosseur du faisceau qui en sera formée et la force avec laquelle le faisceau distendu reviendra sur lui-même sera dans le même rapport.

On ne raisonne pas autrement aujourd'hui que l'histologie nous a montré, dans un muscle, un faisceau de fibres dont les actions s'ajoutent comme celle des chaînettes dont parle le professeur de Naples. Passant à d'autres considérations, cet auteur étudie l'influence de la direction des fibres sur la force qu'elles développent. Il fait remarquer que les muscles dont les fibres, convergent obliquement sur un même tendon comme les barbes d'une plume sur la nervure centrale, ne fournissent ni un parcours ni un effort proportionnel à leurs longueurs et à leurs sections. Il n'y a rien non plus à changer dans cette appréciation de la composition des forces de l'organe musculaire. »

p. 72-73. *« La comparaison entre les machines ordinaires et les moteurs animés n'aura pas été inutile si elle a réussi à montrer que des relations étroites existent entre la forme des organes et les caractères de leur fonction ; que ces rapports sont réglés par les lois ordinaires de la mécanique, de telle sorte qu'en voyant le système musculaire et osseux d'un animal, on peut, de leur forme, déduire tous les caractères de la fonction qu'il possédait.*

On sait, généralement, que le volume transversal d'un muscle correspond à l'énergie de son action : que l'athlète, par exemple, se reconnaît au relief énorme que chacun de ses muscles dessine sous la peau. Mais on connaît moins la signification physiologique de la longueur des muscles, c'est-à-dire du plus ou moins de longueur de leurs fibres contractiles. Et cependant, Borelli avait déjà enseigné la vérité sur ce point. D'après lui, ainsi que nous l'avons vu, cette longueur de la fibre rouge est proportionnelle à l'étendue du mouvement que le muscle est apte à produire.

Partie III. Introduction

Cette distinction entre la fibre contractile ou fibre rouge, et la fibre inerte du tendon est d'une importance capitale. L'expérience a démontré que les muscles en se contractant se raccourcissent d'une quantité qui représente une fraction constante de leur longueur. On peut, sans trop s'écarter de la vérité, estimer à 1/3 de sa longueur l'étendue dont un muscle peut se raccourcir. Mais, quelle que soit la valeur absolue de ce raccourcissement, toujours il est proportionnel à la longueur de la fibre rouge : cela résulte de la nature même des phénomènes qui engendrent le travail dans le muscle.»

p. 74. *« Mais il faut, dans cette étude, se mettre soigneusement en garde contre une cause d'erreur qui tendrait à faire ranger certains muscles courts parmi les muscles longs.*

Borelli lui-même a signalé cette cause d'erreur : il a montré comment les muscles penniformes, c'est-à-dire ceux dont les fibres viennent obliquement s'insérer sur le tendon, comme les barbes d'une plume sur la nervure commune, sont des muscles courts qui prennent l'aspect de muscles longs. Ces notions sont indispensables lorsqu'on veut apprécier le mode de fonctionnement des différents muscles de l'organisme ; elles seules permettent d'estimer la longueur réelle de leur partie contractile. »

p. 107-108. *« Au début de ces études, il faudrait pouvoir retracer les caractères généraux de la fonction qui va nous occuper et signaler les lois générales qui se retrouveront dans tous les modes particuliers de la locomotion animale. Mais quoi de plus difficile que de saisir le trait commun qui rapproche des actes aussi différents que le vol et le ramper, que la course d'un cheval et la natation d'un poisson ? C'est pourtant ce qui a été essayé bien des fois : Borelli a tenté de représenter les différents modes de locomotion terrestre par les différents actes qu'exécute un batelier pour diriger sa barque. Cette comparaison peut, en effet, si on lui ajoute quelques développements, éclairer le mécanisme des principaux types de la locomotion. »*

p. 116. *« Les types de la locomotion terrestre sont tellement variés qu'il faut, pour le moment du moins, nous borner à l'étude des plus importants d'entre eux. Pour la locomotion bipède, nous prendrons comme type celle de l'homme. Le cheval sera choisi comme le plus intéressant représentant de la marche quadrupède. Quant aux autres animaux, ils seront étudiés d'une manière accessoire et surtout au point de vue des ressemblances ou des différences que leurs modes de locomotion présentent avec les types que nous avons choisis. Bien des auteurs ont déjà traité ce sujet : depuis Borelli jusqu'aux physiologistes modernes, la science a lentement progressé ; il nous semble qu'aujourd'hui elle peut résoudre toutes les questions obscures et se fixer définitivement, grâce à l'emploi de la méthode graphique. »*

p. 121. *« Et d'abord, quel point du corps choisirons-nous pour en observer les déplacements pendant la marche ? Presque tous les auteurs ont voulu choisir à cet effet le centre de gravité : ce point que Borelli plaçait inter nates et pubim [entre les fesses et le pubis]. Mais si l'on réfléchit à ce fait, que le centre de gravité change dès que le corps exécute un mouvement ; que dans la flexion des jambes, ce centre de gravité s'élève ; qu'il se déplace dans le même sens si nous élevons les bras ; qu'en un mot, il décrit à l'intérieur du corps toute sorte de mouvement, dès que nous cessons d'être immobiles, on comprendra qu'il est impossible de rapporter à ce point idéal et variable les mouvements de réaction produits par la pression des pieds contre le sol. Mieux vaut choisir un point déterminé du tronc, le pubis par exemple, pour en étudier les déplacements pendant la marche. »*

p. 168. *« En observant les chevaux de trait, il nous a semblé que dans les descentes, lorsque l'animal doit retenir le poids de la voiture qui tend à le pousser, il peut y avoir à la fois trois pieds sur le sol. C'est là ce que Borelli considérait comme le pas normal ; on vient de voir, au contraire, que dans le pas franc, il n'y a jamais à la fois que deux pieds sur le sol. »*

p. 186. *« Après ces études sur la locomotion terrestre, nous devrions exposer le mécanisme de la locomotion aquatique. De récentes expériences de M. Ciotti ont grandement éclairé la fonction propulsive de la queue des poissons ; non pas qu'elles aient renversé la théorie admise depuis Borelli sur le mécanisme de la natation, mais elles ont fait entrer cette question dans une voie nouvelle, celle de la reproduction synthétique de ce phénomène. »*

Partie III. Introduction

p. 221. « Puisque la force d'un muscle est proportionnelle au volume de cet organe, en voyant que les muscles pectoraux représentent 1/6^e environ du poids total de l'oiseau, on comprend tout de suite que c'est à ces puissants organes qu'est dévolu le rôle principal dans l'acte du vol.

Borelli a voulu déduire du volume des pectoraux la force dont ils sont capables ; il a cru pouvoir conclure que la force employée par l'oiseau pour voler égale 10,000 fois son poids. Nous ne réfuterons point l'erreur de Borelli ; assez d'autres se sont chargés de la combattre, en cherchant à substituer aux évaluations du physiologiste Italien des chiffres dont l'exactitude ne serait guère plus facile à prouver. »

p. 222. « Si les estimations de Borelli et même celles de Navier étaient justes, on devrait trouver aux muscles de l'oiseau une force statique très considérable. L'expérience montre que les muscles de l'oiseau ne semblent pas capables d'efforts plus énergiques que ceux des autres animaux. »

2) La prédilection de la démarche expérimentale physico-mathématique

Quand Borelli estime les forces musculaires des membres des animaux par les principes mécaniques, il emprunte cette démarche expérimentale physico-mathématique qui lui permet de discerner les erreurs des anciens.³⁵³ En effet ; Aristote, Galien, Lucrèce, Pline, Cicéron, Gassendi n'imaginaient pas que la nature avait donné aux muscles plus de force qu'il n'en fallait pour agir. Il renverse les fondements des préjugés traditionnels qui répugnaient les lois les plus simples de la mécanique et du calcul.³⁵⁴ Borelli arrive à démontrer malgré de nombreuses erreurs qui seront mises en évidence par ses successeurs, que les muscles développent des forces supérieures à celles qu'ils devraient utiliser pour maintenir ou soulever des résistances, cela à cause de circonstances d'insertions et de positionnements articulaires défavorables. Mais la constitution en deux parties du *De motu animalium* montre les limites à la fin du XVII^e siècle de l'application de cette méthode aux « mouvements internes » que produisent les fonctions du cœur et de la respiration notamment, les quantifications restent excessives pour faire le lien entre les déplacements et leurs coûts physiologiques. Les recherches expérimentales d'Antoine Lavoisier au XVIII^e siècle, sur la relation entre la respiration et l'économie animale conduiront jusqu'aux calculs distinguant le travail des forces externes et des forces internes des êtres vivants, lors des mouvements locomoteurs.

Mais, c'est véritablement à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle que les progrès seront les plus perceptibles avec le perfectionnement des instruments liés à l'expérimentation biologique. L'exemple des travaux d'Auguste Chauveau (1827-1917), révèle la volonté de

³⁵³ Dumas C.-L. *Principes de Physiologie, ou Introduction à la science expérimentale, philosophique et médicale de l'homme vivant.* [Tome Troisième] Paris : chez Deterville, 1800.

³⁵⁴ On pense au raisonnement développé par Grmek dans son livre *La première révolution biologique : réflexions sur la physiologie et la médecine du XVII^e siècle* [Paris : Payot, 1990] qui parle de révolution au milieu du XVII^e siècle, remettant en cause les explications des phénomènes vitaux d'Hippocrate, d'Aristote et de Galien, par l'expérimentation quantitative, l'interprétation mécaniste, l'invention d'instruments de mesures...

Partie III. Introduction

quantifier l'effort, afin de maximiser le travail. Sous ce leitmotiv, les études de ce physiologiste le conduiront à se préoccuper du fonctionnement du tissu musculaire en relation avec la consommation énergétique³⁵⁵. En effet, pour ce savant, la contraction musculaire lors d'un travail positif, résistant ou statique entraîne une dépense d'énergie³⁵⁶. Pour cette logique, il convient de distinguer le travail intérieur du travail extérieur du muscle. Quand celui-ci est soumis à un travail physiologique, il y a conversion d'une énergie chimique qui l'alimente, pour exécuter ce travail mécanique, mais avec de la déperdition calorifique. Le travail intérieur est relatif à cette conversion. Le travail extérieur, lui, désigne l'effet utile produit en dehors de l'organisme : un travail statique, de soutien de charges, et un travail dynamique, parfois positif ou moteur, tantôt négatif ou résistant.³⁵⁷

Cette considération physiologique indissociable d'un travail mécanique reste fondamentale aujourd'hui, même si les travaux de Borelli l'évoquaient déjà, dans la constitution en deux parties du *De motu animalium*, tout comme par l'utilisation récurrente de la notion de puissance motrice et sa détermination dans les différents mouvements physiologiques de la majeure partie des chapitres de la première partie (Chapitres. III, IV, V, VI, VIII, XI, XIII, XVII).

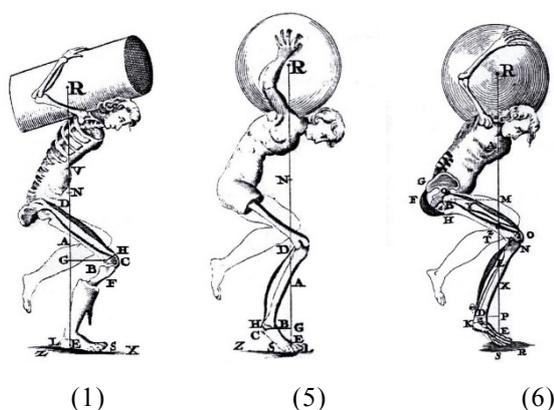


Figure 39. Dans les propositions XL (Tab. IV, Fig. 5), XLI (Tab. IV, Fig. 6) et LIII (Tab. VI, Fig. 1) du *De motu animalium*, les intentions de Borelli sont claires, calculer les forces exercées sur les membres inférieurs et respectivement sur les muscles fléchisseurs responsables du maintien des positions sous une contrainte pondérale définie. Il anticipe en ergonome sur les liens entre un travail à effectuer et un coût physiologique qu'il ne peut encore calculer, mais il initie cette tentative pour ses successeurs.

³⁵⁵ Chauveau A. *Le Travail musculaire et l'énergie qu'il représente*. Paris : Asselin et Houzeau, 1891.

³⁵⁶ Chauveau A. *La vie et l'énergie chez l'animal : introduction à l'étude des sources et des transformations de la force mise en oeuvre dans le travail physiologique*. Paris : Asselin et Houzeau, 1894.

³⁵⁷ Chauveau A. *L'énergie dépensée par le travail intérieur des muscles dans leurs divers modes de contraction*. Paris : Gauthier-Villars, 1904.

Partie III. Introduction

Les travaux très importants sur l'analyse ergonomique et physiologique des postures et des attitudes au travail, de Jules Amar (1879-1935)^{358, 359} suivent ceux entrepris par Auguste Chauveau. Dans ses recherches sur l'énergétique et le rendement des machines animales et humaines, il s'intéresse à quantifier, par une instrumentalisation physiologique poussée (cycles ergométriques, dynamomètres), la dépense énergétique associée au travail des forces selon différentes attitudes ergonomiques. Ces études aboutiront dans la transition des siècles, à l'émergence de concepts physiologiques très importants ceux de : volume d'oxygène, consommation d'oxygène^{360,361} et volume d'oxygène maximal (VO²max.)³⁶² en relation avec des travaux manuels, des rendements mécaniques ou des locomotions particulières. Ces concepts permettent d'établir des liens théoriques entre les modèles physiologiques et mécaniques, plus spécifiquement entre des coûts métaboliques et des rendements mécaniques. Cette association fondamentale des concepts, des lois et des théories quantitatives sur les paradigmes physiologiques et mécaniques a constitué une avancée considérable dans l'optimisation des mouvements et de la locomotion.

Le corps de certains animaux et celui des humains est considéré comme un système biologique physico-chimique complexe. Chez l'homme notamment, avec plus de six cents muscles dont la plupart striés, agissent presque toujours en combinaison pour produire et dissiper l'énergie nécessaire dans plus d'une centaine d'articulations comme le relevaient déjà Katharine Wells³⁶³ en 1976 puis Roger Enoka³⁶⁴ en 1994. Selon certains auteurs, notamment David Winter (1990)³⁶⁵ la cinématique totale du corps humain, qui étudie les déplacements, les vitesses, et les accélérations des segments en mouvement, pourrait demander jusqu'à 180 variables, toutes changeant constamment en fonction du temps. Dans ces conditions, la quantification des mouvements du corps devient un véritable défi. La volonté de trouver des relations, des lois et des théories simplificatrices entre les paramètres et les modèles physiologiques et mécaniques marque l'histoire du mouvement et de la locomotion.

³⁵⁸ Amar J. *Le rendement de la machine humaine : recherches sur le travail*. Paris : J.B. Baillière, 1909.

³⁵⁹ Amar J. *The human motor; or, The scientific foundations of labour and industry*. London : Routledge, 1920.

³⁶⁰ Différence entre la quantité d'oxygène qu'un sujet inspire et celle qu'il expire.

³⁶¹ Les premières découvertes importantes datent de 1923 lorsque deux physiologistes britanniques, Hartley Lupton et Alex Hill, lauréats du Prix Nobel de Médecine, établirent que la consommation maximale d'oxygène augmentait avec la vitesse de déplacement.

³⁶² Exprimé souvent en ml/min/kg, il représente un débit de consommation révélateur de l'importance de la production d'énergie.

³⁶³ Wells K. F. *Kinesiology : the scientific basis of human motion*. Philadelphia: W.B. Saunders, cop. 1971.

³⁶⁴ Enoka R. *Neuromechanical basis of Kinesiology*. Humankinetics. Champaign (Ill.): Human kinetics, [1988], 1994.

³⁶⁵ Winter D. *Biomechanics and motor control of human movement*. New York: J. Wiley and sons, 1990.

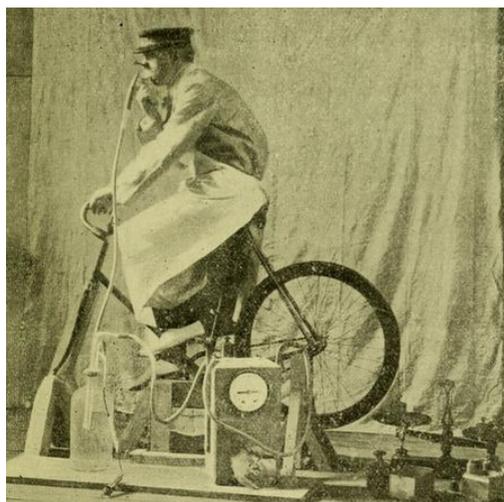


Figure 40. Planche IV. Installation complète du monocycle et de l'appareil à respiration. (Amar J. Le rendement de la machine humaine : recherches sur le travail. Paris : J.B. Baillière, 1909, p. 39.)

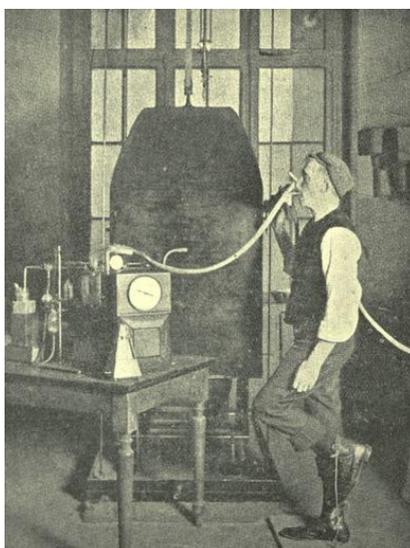


Figure 41. Équilibre sur un pied et mesure de la consommation d'énergie. (Amar J. The human motor; or, The scientific foundations of labour and industry. London: Routledge, 1920, p. 382.)

3) Les lois des proportions corporelles.

Borelli fait souvent référence à une loi galiléenne associant la masse des animaux et leur taille respective, notamment dans la proposition CLXVIII « *Puisque leur corps est si petit et que leur masse est diminuée proportionnellement à la racine carrée de leur volume, comme Galilée l'a démontré d'une manière élégante* », la proposition CLXXVII « *Mais ce dérangement est facilement toléré par les insectes en raison de la petite masse de leur corps en relation avec leur volume. Leur masse, diminue proportionnellement au carré de leur taille si leur forme est identique. Ceci a été démontré par le célèbre Galilée* » et la proposition CLXXXII « *Galilée (sur le déplacement) a démontré que plus les masses des animaux étaient petites et plus petites étaient leurs tailles avec une diminution plus rapide de leurs tailles. La masse est proportionnelle au carré*

Partie III. Introduction

de la résistance et de la force des animaux. Par conséquent, les os des grands animaux ont dû être plus grands pour que leur force puisse résister à l'augmentation de la masse. Par conséquent, les animaux grands et lourds sont moins prompts et agiles que de plus petits animaux. Ainsi il est vrai que des animaux plus légers font de plus grands sauts, relativement à leurs corps, que de plus grands animaux. ».

Cette quête des règles des proportions, des équilibres entre l'harmonie esthétique et la résistance où la force suit son cours dans les théories architecturales des constructions de Vitruve, les perspectives apparentes ou dissimulées des attitudes corporelles et de leurs mouvements. L'étude de la résistance des corps par l'analyse des contraintes de ruptures osseuses chez Galilée³⁶⁶, l'analyse des formes des coques de bateaux pour l'optimisation de leur déplacement agencent différents facteurs apparemment dissociés, mais qui élaborent des rapports particuliers porteurs de sens notamment celui du nombre de William Froude pour la locomotion. La théorie constructale d'Adrian Bejan créée à la fin des années 90, qui explique l'émergence de nombreuses formes naturelles tout en s'appliquant à la locomotion suit d'une autre manière cette aventure continue. Entre-temps, d'autres travaux sur la transformation structurale du biomathématicien D'Arcy Wentworth Thompson³⁶⁷ et l'optimisation du mouvement animal et humain par les biomécaniciens Robert McNeill Alexander et Alberto Enrico Minetti, ont élaboré d'autres hypothèses. Ils interpellent les proportions sur la longue durée historique pour trouver des relations entre les locomotions de multiples catégories animales ou humaines, saines ou malades, jeunes ou âgées, vivantes ou ayant disparues depuis des siècles comme les dinosaures. Ils essaient d'élaborer des liens théoriques pour optimiser les déplacements, comprendre les transformations morphologiques et les disparitions d'espèces, appréhender les maladies, argumenter que le mouvement dans l'eau, dans l'air ou sur le sol pourrait être identique.

³⁶⁶ Ascenzi A. Biomechanics and Galileo Galilei. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(2), p. 95–100.

³⁶⁷ Thompson D. W. *Forme et croissance*. Traduction par Dominique Teyssié de « On Growth and Form » [1917]. Paris : Ed. du Seuil : Ed. du CNRS, DL 1994.

Chapitre 1. Permanences et dépassements des modèles analogiques

Le récit passionnant de Bertrand Gille sur *Les ingénieurs de la Renaissance*, expose une histoire continue des modifications par bribes des techniques traditionnelles associées aux conceptions théoriques des précurseurs ; c'est ainsi que l'on retrouve les travaux d'Archimède, d'Euclide à côté de Vinci pendant une durée historique longue. Ses travaux relèvent que « *S'il est un domaine où la continuité dans l'effort semble de règle, où cette continuité se marque tout aussi bien dans la transmission d'un savoir que dans les inventions, que dans l'imagination qui n'a pour support qu'un long cheminement de la pensée, c'est bien la technique* »³⁶⁸. La transmission technique c'est effectuée progressivement, par essais erreur depuis finalement l'origine de l'homme avec la fabrication de ses outils, de ses instruments de survie. Les mécaniciens grecs génèrent une période technologique qui se confirme avec ses atouts à la Renaissance. À la fin du Moyen Âge, la société utilise et vit avec des machines qui, précisément, produisent du mouvement pour améliorer le rendement.

Dans ces avancées de la connaissance, la démarche explicative use fréquemment de l'analogie et de la métaphore,³⁶⁹ il en est de même pour comprendre le corps en mouvement, la machine représente une analogie providentielle. L'espace corporel est considéré comme identique à l'espace de la machine. La rationalisation de la locomotion sera la réplique de la rationalisation machinique : celle-ci fournit le modèle et le vocabulaire des « leviers » osseux, du « soufflet » pulmonaire, de la « pompe » cardiaque « aspirante et foulante ». L'économie animale et humaine se conçoit le plus souvent sur un plan théorique comme une espèce de machine.

Explorer les théories du corps en mouvement incite donc à faire le détour par les machines. Selon la conception mécaniste triomphante, tous les objets de connaissance, le corps entre autres, sont des variétés de machines. Les sciences mises à l'honneur seront alors celles qui permettent de comprendre au mieux le fonctionnement machinique. Ce qui pourrait expliquer une cause de la prééminence arbitraire des sciences dites « fondamentales » comme l'anatomie, la physiologie et la mécanique.

³⁶⁸ Gille B. *Les ingénieurs de la Renaissance*. Paris : Hermann, 1964, p. 13.

³⁶⁹ Durand-Richard M.-J. *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique, perspective historique*. Paris : L'Harmattan, 2007.

Il n'est peut-être pas sans intérêt de s'interroger sur les grands modèles de machines qui ont eu cours dans les derniers siècles, car les analyses du mouvement et de la locomotion corporelle se sont inspirées de certains de ces modèles. La réponse de façon sérieuse à ce problème épistémologique délicat nécessiterait des analyses approfondies, appuyées sur de nombreuses références aux productions d'époque et de développer la comparaison des différents modèles. Mais schématiquement depuis l'origine trois générations successives de machines s'identifient à savoir : les machines de première génération dite machines simples, les machines de seconde génération énergétiques et enfin les machines informationnelles. À chacune de ces catégories de machines, correspondent des modèles théoriques de locomotion animale et humaine où les raisonnements et les outils conceptuels peuvent se rassembler.

1) L'analogie du corps à la machine

Comment fonctionnent ces animaux qui ont servi d'instruments analogiques³⁷⁰ aux meilleures de nos inventions et machines ? Ces machines dont les coûts énergétiques³⁷¹ et les rendements³⁷² restent bien en deçà des locomotions biologiques. En tant que réalité technique, la machine est une construction artificielle qui consiste en « un assemblage de parties déformables avec restauration périodique des mêmes rapports entre les parties »³⁷³. Son rapport à l'énergie est essentiel, car elle a pour fonction de transformer de l'énergie provenant d'une source naturelle (eau, vent, vapeur, électricité, pétrole, atome, soleil) et d'utiliser cette transformation. Sur le plan épistémologique, la structure et le fonctionnement de la machine ont longtemps servi à expliquer la structure et le fonctionnement du corps vivant.

Aujourd'hui encore, l'analogie peut servir d'exemple simplificateur de compréhension et d'apprentissage de la biologie ou plus précisément de la biolocomotion³⁷⁴. Sabine Renous, directrice de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique au laboratoire d'anatomie comparée du Muséum National

³⁷⁰ Pettigrew J. B. *La locomotion chez les animaux, ou Marche, natation et vol, suivie d'une dissertation sur l'aéronautique*. Paris : G. Baillière, 1874.

³⁷¹ Le coût énergétique représente une quantité d'énergie consommée par unité de distance parcourue.

³⁷² Rapport de la quantité totale d'énergie utilisable à la sortie d'un procédé à la quantité totale d'énergie à l'entrée.

³⁷³ Canguilhem G. *La connaissance de la vie*. Paris : Hachette, 1952.

³⁷⁴ Cappelletto A., Marchetti M., Tosi V. *Biolocomotion: Centuty of research using moving pictures*. Rome : Promograph, 1992. (Livre qui a fait suite au symposium sur ce même titre réalisé à Formia en Italie du 13 au 17 Avril 1989, sous le patronage de la Société Internationale de Biomécanique (ISB). L'expression « biolocomotion » faisant référence à l'analyse de la locomotion par la biologie nous semble parfaitement adaptée à l'ensemble de notre étude.)

d'Histoire Naturelle note en 1990 : « Dans le cadre de la locomotion, la "machine animale " que constituent les Vertébrés fonctionne comme un système automobile. Elle possède des leviers, des poulies, des engrenages, formés par les os et les articulations. Ces derniers sont actionnés par les muscles qui jouent un rôle moteur. L'énergie nécessaire au travail de la machine est fournie par la transformation d'énergie chimique en énergie mécanique (plus thermique). Les études biomécaniques et physiologiques ont fait apparaître toute la complexité de cette machine, soumise à la mise en jeu répétitive de programmes moteurs stéréotypés, qui sont induits par l'activité de générateurs rythmiques dans le système nerveux. Cette rigidité apparente du fonctionnement de la machine cache en fait, une grande capacité d'adaptation »³⁷⁵

Finalement dans cette thèse s'articule toute une série d'analogies entre le fonctionnement de l'être biologique et celui des machines, depuis les travaux des premiers penseurs sur le déplacement des êtres vivants, un rapide survol, assurément très schématique, permet de différencier trois modèles de machine : mécanique, énergétique et informationnel, ceux-ci ne sont cependant pas exclusifs les uns des autres. Généralement, une machine d'un niveau supérieur utilise et implique aussi des principes relevant des machines précédentes : une machine informationnelle est aussi énergétique. Parfois même, on observe l'inverse : ainsi la machine à vapeur était-elle équipée dès le XVIII^e siècle du régulateur à boules de Watt qui était un servo-mécanisme exemplaire et le canard de Vaucanson déroulait un tambour à aspérités qui préfigurait un programme, tout comme les cartes dépliantes à trous de l'orgue de barbarie de la même époque.

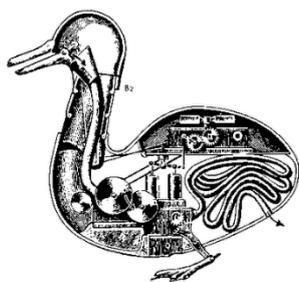


Figure 42. Canard de Vaucanson imitant non seulement les mouvements extérieurs d'un canard, ainsi que ses facultés digestives, mais peut-être inventé par Dominique François Bourgeois.

2) Les machines mécaniques élémentaires

Les machines simples dites de la première génération établissent leurs principes qui relèvent de la mécanique élémentaire. En effet, elles transmettent un travail reçu en

³⁷⁵ Renous S. *Locomotion*. Paris : Dunod, 1990, p. 2. Ce volume souligne la diversité des modes de locomotions adoptés par les vertébrés face aux contraintes de l'environnement. L'auteur classe, caractérise et illustre, à l'aide de très nombreux exemples, chaque mode de locomotion : aquatique, terrestre et aérien.

Partie III. Chapitre 1. Permanences et dépassements des modèles analogiques

multipliant la force exercée : levier, treuil, palan, baliste, catapulte, horloge à poids, moulins à vent et à eau... L'auteur le plus représentatif de cette vision mécaniste transposée à l'organisme humain est certainement René Descartes qui, non seulement a exposé le principe des machines simples, mais en a aussi transféré l'argument dans sa conception du corps machine. Parlant effectivement du corps humain comme d'un automate plaisant des jardins royaux, Descartes est catégorique quand il affirme « *Et véritablement, l'on peut fort bien comparer les nerfs de la machine que je vous décris, aux tuyaux des machines de ces fontaines ; ses muscles et ses tendons, aux autres divers engins et ressorts qui servent à les mouvoir ; ses esprits animaux, à l'eau qui les remue, dont le cœur est la source, et les concavités du cerveau sont les regards. De plus, la respiration et autres actions qui lui sont naturelles et ordinaires, et qui dépendent du cours des esprits, sont comme les mouvements d'une horloge ou d'un moulin, que le cours ordinaire de l'eau peut rendre continu* »³⁷⁶. Le corps agissant serait un automate analogue aux machineries que Descartes a lui-même élaboré avec l'ingénieur Étienne de Villebressieu. Nos actions s'accomplissent, écrit notre auteur, « *en même façon que le mouvement d'une montre est produit par la seule force de son ressort et la figure de ses roues* »³⁷⁷. La démarche cartésienne tend à réduire les principes de la physiologie aux principes de la physique. Le mouvement ne concerne que la substance étendue. Les règles de la mécanique sont jugées suffisantes pour rendre compte de l'individu agissant.

Aussi étonnant que cela paraisse, ce point de vue du XVII^e siècle a sous-tendu la majorité des analyses du mouvement du XX^e siècle. Les traités d'anatomie qui considèrent la locomotion s'appuient pour convaincre leur démonstration sur des notions d'inspiration mécanique : l'étude des leviers, des parallélogrammes de forces, et des couples de rotation y règne sans partage. La compréhension d'une locomotion spécifique se réduit à des problèmes de forces, de pesanteur et de centre de gravité. Une conduite motrice est conçue comme une juxtaposition de mouvements séparés tout comme l'horloge cartésienne est constituée d'une addition de rouages successifs. Le mouvement reposait sur une conception et des théories biomécaniques des corps agissants traités sur le modèle machinique de Descartes « *Que toutes les fonctions qui lui sont attribuées sont des suites de la disposition de ses organes* ».³⁷⁸ La démarche mécanique borélienne développée

³⁷⁶ Descartes R. *Œuvres de Descartes, publiées : Les passions de l'âme. Le monde, ou Traité de la lumière. L'homme. De la formation du fœtus*. [Publiés par Victor Cousin]. Paris : chez F. G. Levrault, Libraire, 1834, p. 347-348.

³⁷⁷ *ibid.* p. 51-52.

³⁷⁸ *ibid.* p. 524.

dans le *De motu animalium* s'appuie sur cette logique des dispositifs élémentaires des machines simples.

3) Les machines énergétiques

La vie, principalement mouvement et dynamisme, suppose utilisation et transformation énergétique dont elle ne saurait se passer. Elle apparaît comme un flux, qui se renouvelle perpétuellement selon une auto synthèse. La vie caractérise l'action et la transformation dans le temps et l'espace pour cela elle assimile des substances nutritives pour produire de l'énergie et générer entre autres du mouvement. La matière et l'énergie constituant le vivant représentent une partie de l'édifice complexe dont les substances appartiennent aux mêmes classes dans tous les êtres organisés. Dans ce sens l'être vivant, machine thermodynamique transformatrice d'énergie chimique en énergie mécanique constitue un système physiquement ouvert et entropique conduisant à la mort certaine.

L'application des lois chimiques et physiques permet d'appréhender la lutte de l'être vivant contre cette entropie. C'est toute l'histoire de la locomotion des corps des êtres vivants et de ses tentatives scientifiques pour l'expliquer par l'intermédiaire de sciences adaptées à l'apparent et au supposé qui fera dire à Henri Milne-Edwards qu'à ses yeux, « *la physiologie et l'anatomie sont des parties inséparables d'une seule et même science. Non seulement elles se prêtent un mutuel et nécessaire appui, mais leur but est commun, et elles doivent se confronter sans cesse dans la pensée de tous ceux qui à l'exemple d'Aristote, cherchent à connaître la nature des animaux* »³⁷⁹

Les machines énergétiques ou machines de la seconde génération utilisent et font passer l'énergie d'une forme dans une autre (notamment la quantité cinétique), nées au XVIII^e siècle, elles sont à l'origine des révolutions industrielles qui ont accentué le rendement dans les sociétés modernes. En fonction du type d'énergie utilisée, Georges Friedmann distingue trois révolutions industrielles successives : la première, née au XVIII^e siècle, est marquée par l'énergie thermique (machine à vapeur et charbon) ; la seconde, apparue vers la fin du XIX^e siècle, est principalement caractérisée par l'invention du moteur à explosion et par l'exploitation industrielle de l'électricité ; la troisième enfin s'impose au milieu du XX^e siècle en mobilisant l'énergie nucléaire. La comparaison du corps en action avec la machine à vapeur ou le moteur à explosion est

³⁷⁹ Milne-Edwards H. *Leçons sur la physiologie : et l'anatomie comparée de l'homme et des animaux*. Paris : Masson, 1857, p. 1.

une banalité même dans les textes du XIX^e siècle sur la physiologie de l'effort. L'ensemble de l'œuvre du français Jules Amar sur les tentatives de quantifications et d'instrumentalisation de l'effort physiologique de l'animal et des attitudes de l'homme au travail patentent des changements de paradigmes. L'élaboration du trottoir dynamographique exposé dans les comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences dévoile l'accès aux valeurs dynamiques de la locomotion pendant la marche, la course ou le saut, chez des sujets sains, mais aussi amputés avec prothèses.

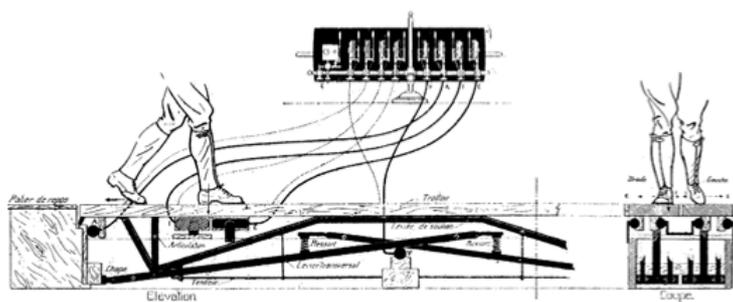


Figure 43. *Énergétique biologique. Trottoir dynamographique. Note de M. Jules Amar, présentée par M. Dastre. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Paris, Imprimeurs – Libraires Gauthier-Villars et Cie, Tome 163, Juillet – décembre 1916, p. 130-132. Ce système de plancher ou trottoir peut transmettre et ainsi permettre d'enregistrer les mouvements et les efforts des jambes dans la locomotion.*

1. Georges Demenÿ : une démarche fondée sur des lois générales.

L'une des grandes figures de l'étude du mouvement associé à Étienne-Jules Marey se trouve en la personne de Georges Demenÿ qui pour caractériser la locomotion chez l'homme l'associe à « *la machine motrice puissante et silencieuse d'un navire* ». ³⁸⁰ Ce point de vue initie une des caractéristiques de sa méthode : la recherche du « *développement foncier* » par une sollicitation intense des grandes fonctions organiques (autrement dit la recherche d'une grande dépense énergétique). Ce souci foncier animera Demenÿ dont un titre d'ouvrage paru en 1914 est significatif du point de vue énergétique adopté ainsi que des connotations morales dont il est chargé : « *L'Éducation de l'Effort* » ; les termes force, rendement, économie, effort, travail, énergie reviennent perpétuellement dans ses exposés. Considérant la « *machine humaine* », Demenÿ envisage même un « *classement des exercices d'après leur dépense* » ; il y renoncera à cause des difficultés techniques d'évaluation. Avec son siècle, l'auteur de *Mécanisme et éducation des mouvements* ³⁸¹ pense en termes de physiologie et

³⁸⁰ Demenÿ G. *L'Éducation de l'effort, psychologie, physiologie*. Paris : Félix Alcan, 1914, p. 5.

³⁸¹ Demenÿ G. *Mécanisme et éducation des mouvements*. Paris : Félix Alcan, 1904, p. 12.

Partie III. Chapitre 1. Permanences et dépassements des modèles analogiques

d'énergie. Il rappelle l'importance du modèle énergétique de la machine : « *Nous sommes soumis, confirme-t-il, aux mêmes lois que les machines ordinaires, pour ce qui est de la production de l'énergie et son utilisation* ». ³⁸² En réalité, les études sur la machine humaine et le mouvement rationnel ne passèrent réellement dans les faits que dans la seconde moitié du XX^e siècle.

Actuellement, les recherches poussées en biologie de l'effort sont en continuité avec les travaux de Demenÿ. Et lorsque, des équipes de chercheurs développent des analyses informatiques des mouvements d'animaux en couplant une caméra avec un ordinateur, ils ne font que prolonger les travaux que Demenÿ avait présentés dans *Mécanisme et Éducation des Mouvements*. Les moyens utilisés sont certes beaucoup plus perfectionnés, mais les analogies entre les schémas d'analyses et les théories des chercheurs actuels et ceux de Georges Demenÿ (notamment ceux qui font appel à la chronophotographie) sont frappantes. Le chercheur moderne a remplacé le tambour enregistreur par l'écran cathodique. Mais il est clair, dans ce cas, que la machine à traiter de l'information est totalement subordonnée à une représentation mécanique et énergétique du geste humain. Ce n'est que plus d'un siècle après sa découverte que le modèle énergétique du mouvement trouve son application dans différents champs. Actuellement, nous vivons l'apogée de cette conception énergétique qui, selon le vœu de Demenÿ, fait de l'analyse du mouvement le terrain d'action du « *mécanicien biologiste* ». ³⁸³

En 1904 Georges Demenÿ notait que : « *Dans toute analyse d'une attitude ou d'un mouvement, il y a un problème de mécanique et une question de physiologie. Le problème de mécanique est facile à poser ; il consiste à déterminer les résistances dues à la pesanteur, aux réactions diverses s'exerçant sur le corps à les composer entre elles pour en déduire l'action musculaire et par suite les muscles entrant spécialement en jeu pour équilibrer les premières. Suivant la direction, le sens et la nature du mouvement on se rendra compte de l'antagonisme entre les muscles et les résistances à vaincre. Il faut tenir compte des résistances d'inertie des différentes parties du corps et des masses à mouvoir. Les variations de vitesse mesureront le travail produit. Chaque mouvement peut être également étudié au point de vue physiologique, c'est-à-dire d'après ses effets sur le corps, et au point de vue pédagogique ou éducatif, c'est-à-dire les avantages qu'il procure à l'individu.* » ³⁸⁴

³⁸² Demenÿ G. *Pédagogie générale et Mécanisme des Mouvements*. Paris : Félix Alcan, 1922, p. 12.

³⁸³ *ibid.* p. 13.

³⁸⁴ Demenÿ G. *Mécanisme et éducation des mouvements*. Première édition, Paris : Alcan, 1904. Pour la présente édition, Paris, Edition Revue « EP. S », 1993, p. 71. L'auteur était l'ancien chef de laboratoire de la station physiologique, Professeur du cours d'éducation physique de la ville de Paris et de physiologie appliquée à l'école militaire de gymnastique de Joinville-le-Pont, Directeur du cours supérieur de l'Université mais surtout collaborateur d'Etienne-Jules Marey professeur à la Chaire d'Histoire naturelle des corps organisés de 1869 à 1904 au Collège de France, ainsi que membre de l'Académie de Médecine.

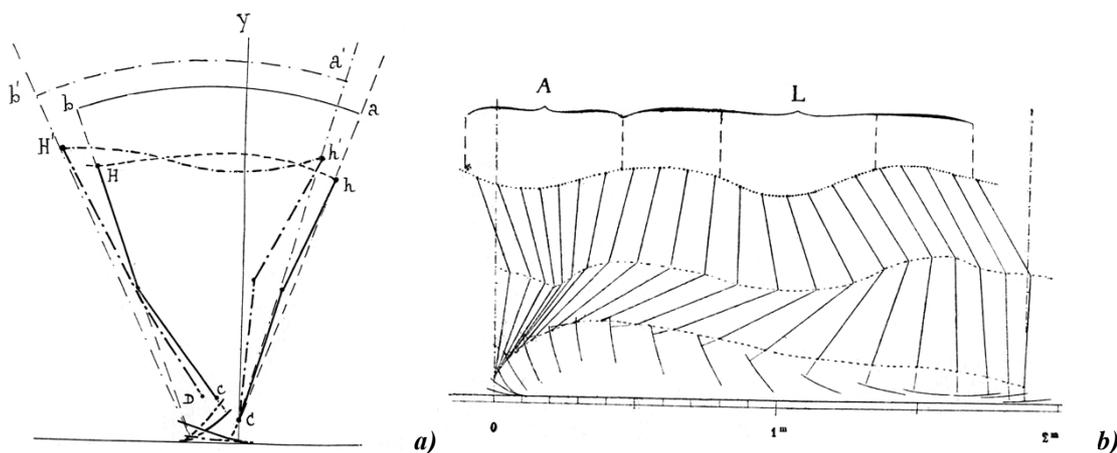


Figure 44. (a) Position et trajectoire des articulations du membre inférieur dans la marche et dans la course modérée. *h H*, trajectoire de la hanche dans la marche ; *h' H'*, trajectoire dans la course ; *C Y*, verticale passant par la cheville à l'appui ; *a b, a' b'* angles de déroulement. (b) Analyse chronophotographique d'un pas de course modérée. *A*. période d'appui du pied droit ; *L*. période de lever du pied. (Demenÿ G. *Mécanisme et éducation des mouvements*. Paris : F. Alcan, 1920, p. 277-279).

Il développait autour de cette idée une logique fondée sur les cinq plus importantes lois générales du mécanisme des mouvements qu'il adaptait à l'étude de la locomotion et énonçait ainsi :

- 1) La loi du moindre effort. Selon lui par l'éducation et par instinct nous trouvons les conditions les plus économiques de l'application de nos efforts, nous réduisons le nombre des contractions musculaire au minimum utile et leur intensité à la valeur de la résistance à vaincre.
- 2) La loi de répartition des efforts suivant les résistances à vaincre. Toute résistance opposée à une partie du corps fait naître une action musculaire égale et opposée ; par exemple une résistance extérieure produisant la flexion du bras fera naître un effort ou réaction musculaire d'extension et inversement.
- 3) La loi du relâchement des muscles. Toute résistance appliquée sur une partie du corps a pour effet de relâcher les muscles dont elle remplace la fonction ; par exemple, si le bras est étendu passivement par une résistance extérieure, les muscles extenseurs tombent dans le relâchement.
- 4) La loi d'inertie. Le corps et toute partie du corps tendent à conserver leur état de repos ou de mouvement ; le passage du repos au mouvement ou d'un mouvement à un autre mouvement avec vitesse ou direction variées ne peut se faire sans le concours des forces ; les forces motrices sont intérieures au corps, mais ce dernier ne peut se mouvoir sans points d'appui extérieurs.
- 5) La loi des masses. La vitesse d'un mouvement est en rapport avec la masse à mouvoir, les résistances à vaincre et la force motrice ; le travail se mesure par la force vive, il est proportionnel à la masse en mouvement et au carré de la vitesse de celui-ci.

C'est une démarche organisée d'après certaines conceptions philosophiques du XIX^e siècle, où il convient d'étudier tout être vivant dans tous ses phénomènes, sous deux

rappports fondamentaux³⁸⁵ : sous le rapport statique et sous le rapport dynamique, c'est-à-dire comme apte à agir et comme agissant effectivement.

4) Les machines informationnelles

Enfin, les machines de la troisième génération appelées machines informationnelles se sont développées de façon fulgurante après la Seconde Guerre mondiale autour de disciplines qui prenaient comme objet la communication et la transmission de l'information (théorie de l'information, cybernétique, informatique...). Des automates de plus en plus perfectionnés étaient construits, de la tortue du neuro-physiologiste William Grey Walter, aux fusées spatiales. La machine automatique n'était pas une totale nouveauté, Léonard de Vinci avait déjà conçu un lion mécanique à l'invitation de François 1^{er}, Descartes participait aussi à la confection d'automates et plus tard Vaucanson élaborait plusieurs machineries au XVIII^e siècle, restées longtemps célèbres. Mais une innovation de taille est apparue : l'existence d'un programme susceptible de traiter des signaux. L'automate devait être capable d'autorégulation par traitement des informations reçues en retour de sa propre action. Au lieu de penser en termes de transmission d'énergie, la seconde moitié du XX^e siècle raisonne en termes de transmission de signaux et de messages.

Ce traitement de l'information est devenu mécanisable avec un organe de commande et de contrôle capable de gérer un algorithme, une séquence ordonnée d'opérations finalisées. Ces machines de type mécanique, hydraulique, électronique deviennent esclaves d'un dispositif régulateur de commande. Il s'agit de servomécanismes qu'on retrouve dans les domaines industriel, militaire, spatial, médical, mais aussi de plus en plus dans la vie quotidienne. Ces recherches nouvelles, regroupées sous le nom ancien de « cybernétique » ou art de gouverner, présentent un grand intérêt dans le domaine de l'étude du mouvement, et concernent aujourd'hui les neurosciences.

Il convient de relever un grand décalage historique entre l'apparition des modèles scientifiques et leur utilisation dans l'analyse du mouvement. La locomotion et certaines actions corporelles ont été purement et simplement assimilées à une machine biologique malgré qu'un modèle maîtrisé ne prétende représenter fictivement que certains aspects partiels d'un fonctionnement dont la signification globale le déborde. Il convient d'envisager une autre interprétation qui ne réduise plus la motricité à un schéma machinique classique,

³⁸⁵ Ducrotay H.-M. *De l'organisation des animaux. Principes généraux d'anatomie comparée*. Paris : F. G. Levraut, 1822.

Partie III. Chapitre 1. Permanences et dépassements des modèles analogiques

mais cela reste difficile devant les analogies mécaniques simplificatrices de complexités, mais révélatrices imagées de fonctionnement.

Chapitre 2. Localisation du centre de gravité

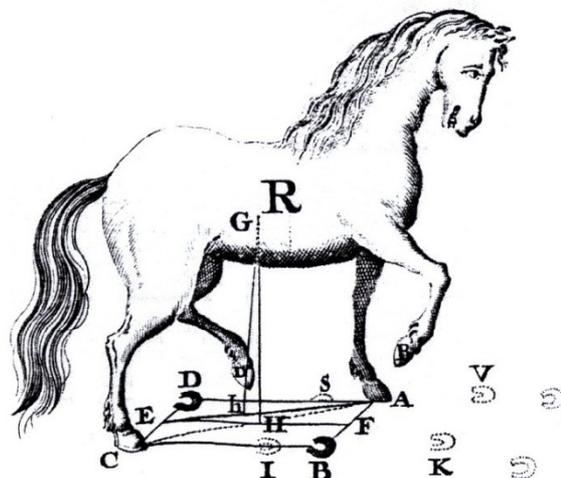


Figure 45. Borelli note que les quadrupèdes ne peuvent pas se tenir seulement sur leurs deux pattes antérieures AB. Leur corps long ne peut pas être suffisamment érigé pour mettre la ligne de pesanteur GH au centre entre les deux pieds antérieurs AB. S'ils se lèvent violemment, en raison de la petite dimension de leurs pieds, la ligne de pesanteur GH est facilement au-delà des appuis plantaires AB sur un côté ou l'autre et ils doivent tomber. Pour la même raison, les quadrupèdes ne peuvent pas rester en se tenant sur leurs seules jambes de derrière CD ou seulement quelques instants (De Motu Animalium, Chapitre XVIII, Proposition CLI).

On distingue plusieurs espèces de stations, la station bipède, à corps vertical ou à peu près, la station bipède à corps non vertical et la station quadrupède. La première est celle de l'homme, des singes et de quelques autres mammifères, la seconde celle des oiseaux et la troisième, celle de la généralité des animaux quadrupèdes. La station et les éléments sur lesquels elle repose représentent le point de départ de l'étude de la locomotion. Pour l'animal comme pour l'homme, il est impossible de courir avant d'avoir appris à marcher, ni de marcher avant de pouvoir se tenir debout.

De ce fait, la première étape à franchir consiste à équilibrer son corps contre l'attraction de la pesanteur pour se maintenir debout. Tant que l'animal ne peut maintenir sa ligne verticale tracée de son centre de gravité jusqu'au sol, pour qu'elle s'ajuste précisément à l'intérieur de la zone de contact du corps avec le sol, il chute.

Un animal se tenant sur ses quatre pattes peut être comparé à une table avec des pieds configurés pour supporter les dispositions des appuis les plus fréquentes. Son centre de gravité évidemment situé quelque part dans la région moyenne du tronc se

Partie III. Chapitre 2. Localisation du centre de gravité

trouve aussi sur une verticale qui ne s'éloigne guère du centre de la grande base de sustentation de l'animal. Le centre de gravité est supposé déterminé, et par conséquent aussi sa projection en un point situé sur le plan et dans l'intérieur de la base de sustentation. Les charges supportées par chaque pied ou leurs pressions sur le sol, seront en somme égales au poids total du sujet, et entre elles, dans le rapport inverse de leur distance à la projection du centre de gravité.

L'étude détaillée de l'anatomie des membres inférieurs qui maintiennent les corps en position debout a son importance dans la compréhension analytique des postures et de leurs équilibres, mais il convient principalement de relever trois points essentiels dans cette gestion des attitudes. D'abord, que l'existence des articulations permet à l'animal de plier et d'étendre ses segments se faisant pour pouvoir se relever du sol, que l'aptitude des membres à se comporter comme des supports rigides pour le corps dépend de la présence de muscles, enfin que l'aptitude du membre à accomplir la tâche qui lui est dévolue dépend principalement de la forme de ses appuis que des parties supérieures du membre.

1) La station quadrupédique

Pour les animaux quadrupèdes se tenant debout, la figure d'une table modèle, montre qu'aussi longtemps que le centre de gravité d'un animal ne repose pas exactement à mi-chemin entre ses pieds de devant et ses pieds de derrière, l'animal dispose toujours alternativement de deux triangles de sustentation, triangles constitués par les deux pieds les plus proches du centre de gravité, et l'un ou l'autre des deux pieds en sont les plus éloignés.

Cependant si l'assimilation du quadrupède avec la table à quatre supports donne une visualisation globale de la posture des animaux, tous les éléments de la table sont rigides et solidaires entre eux, ce qui n'est pas le cas des segments inférieurs mobiles et doués d'une certaine indépendance chez l'animal. En effet, alors que l'équilibre dans l'objet se révèle constant et perpétuel, chez l'être animé, il fluctue à chaque instant passant d'état de rigidité momentanée à d'autres, révélant une assimilation difficile.

Selon les catégories de mammifères, il existe deux genres principaux d'animaux ; ceux chez lesquels le centre de gravité est situé plus près des pieds de devant, et les autres de l'arrière.

Le cheval exemple du premier type, par cette conséquence au repos se positionne le plus souvent avec un pied de derrière reposant sans effort sur le sol, tout comme il

Partie III. Chapitre 2. Localisation du centre de gravité

peut ruer sans perdre l'équilibre. Mais pour soulever un des pieds de devant il doit se forcer à porter son poids sur ses deux pieds de derrière. Les animaux comme les écureuils et les ours appartenant à l'autre classe, se tiennent tous normalement avec leurs poids très en arrière, vers les pieds de derrière, et en conséquence chacun des membres antérieurs peut être soulevé leur permettant de devenir bipède en amenant le centre de gravité de leur corps au-dessous des pieds arrière. Cela n'est possible que si les surfaces portantes des pieds constituent une zone de contact assez grande sous la ligne d'action du poids de l'animal. Quant au kangourou son centre de gravité étant en arrière de ses pieds de derrière, le triangle de support lui est fourni par ses pieds de derrière et sa queue.

En règle générale l'attitude des animaux debout, appuyés sur une ou plusieurs de leurs extrémités représente un état essentiellement actif nécessitant un certain déploiement de forces musculaires qui ne peut être prolongé longtemps pour la plupart des animaux, à moins que des dispositions mécaniques spéciales ne viennent se substituer, en grande partie, aux efforts des puissances contractiles, comme chez le kangourou.

La station quadrupédique représente la position dans laquelle la base de sustentation possède le plus d'étendue et l'équilibre le plus de stabilité. Elle équivaut à une disposition d'autant plus pénible que la masse du corps est plus lourde, que les rayons des membres sont plus fléchis les uns sur les autres, qu'enfin il y a moins de dispositions mécaniques pour limiter la flexion des membres et maintenir les efforts musculaires.

L'état de l'appareil locomoteur dans la station montre que cette attitude nécessite des efforts musculaires plus ou moins considérables, et que, par conséquent, elle ne peut être indéfiniment prolongée, si des dispositions mécaniques ne viennent au secours des puissances musculaires. En effet, les rayons des extrémités étant, pour la plupart, fléchis les uns sur les autres, l'épaule sur le bras, le bras sur l'avant-bras, la cuisse sur la jambe, celle-ci sur le pied, il en résulte que le poids du corps tend à augmenter cette flexion et à affaisser le tronc sur les extrémités. Les leviers destinés à transmettre au sol le poids du tronc du quadrupède se communiquent l'un à l'autre leur charge sous des inclinaisons considérables, inclinaisons qui correspondent d'une manière générale à une situation intermédiaire à la flexion et à l'extension. Cette disposition angulaire modifie notablement les lois de la transmission du poids d'un des éléments au suivant et la

différencie singulièrement de celles qui président aux transmissions analogues dans les corps inorganiques.

Or, pour prévenir cet affaissement, maintenir les membres dans leur fixité et leur donner une rigidité convenable, il faut une contraction plus ou moins énergique de la part des extenseurs, ce qui rend la station fatigante. Mais la contraction des muscles n'étant pas continue ou incessante, la station ne saurait être que momentanée. Néanmoins, cette attitude peut se prolonger longtemps, parce que, d'une part, les extenseurs étant multiples dans chaque région, ils peuvent agir et se reposer tour à tour, et d'autre part, diverses dispositions habilement combinées viennent en aide à l'action musculaire.

En effet, la station a été aussi distinguée chez les solipèdes, dont le pied n'a qu'un seul doigt doté d'un sabot, en libre et en forcée, suivant que les quatre membres ou trois d'entre eux seulement supportent le corps. Cette distinction, ne s'applique qu'à ces seuls animaux. Dans la station libre, le corps est soutenu par trois membres ; l'autre, qui est toujours un membre postérieur, se trouve légèrement fléchi, n'appuie sur le sol que par la pince et ne supporte point sa part du poids de la masse totale, mais, après s'être reposé pendant un certain temps, il revient à l'appui, et le second prend la même situation pour se reposer à son tour, et ainsi successivement. C'est à cette particularité fort remarquable que les solipèdes doivent, en grande partie, l'aptitude à rester debout pendant très longtemps. Dans la station forcée, les quatre membres sont appuyés au sol ; l'un n'est ni moins fléchi, ni plus avancé que l'autre : chacun supporte sa part proportionnelle du poids du corps.

2) La station bipédique

La station bipédique est celle de l'homme, des oiseaux et momentanément de quelques singes et de divers autres mammifères. Celle de l'homme a deux variétés, la première dans laquelle le corps est porté sur les deux membres abdominaux étendus et correspondants à la station forcée des quadrupèdes, la seconde où le corps est en grande partie appuyé sur l'un des membres, l'autre demeurant demi-fléchi, le genou en avant et le pied à peine appuyé sur le sol, celui-ci répond à la station libre des solipèdes.

Dans la station bipède de la première variété, le fémur et le tibia se trouvent sur la même ligne, les genoux en extension et les deux pieds reposent sur le sol, du talon aux extrémités des doigts. L'équilibre est maintenu dans les parties du tronc, sans grands efforts musculaires, car la ligne de gravitation de la tête passe par le trou occipital

Partie III. Chapitre 2. Localisation du centre de gravité

comme Weber³⁸⁶ notamment l'a prouvé et celle du tronc, étendue de la première vertèbre à l'extrémité du sacrum, sur l'axe du bassin ou un plan qui, passant par les articulations coxo-fémorales, arriverait aux articulations tibio-astragaliennes. Néanmoins il faut que les muscles cervicaux postérieurs retiennent la tête qui tend à tomber en avant, et que les extenseurs de la colonne vertébrale en assurent la rigidité, qu'enfin les extenseurs de la jambe et le gastrocnémien tiennent le genou plus ou moins tendu.

Dans la seconde variété le membre qui supporte le corps est fortement étendu et le tronc un peu déjeté de son côté, de manière à rapprocher la ligne de gravitation du pied à l'appui. Le membre dégagé est demi-fléchi, le genou en avant et le talon légèrement soulevé. Elle est moins fatigante que la première et permet aux membres de se reposer tour à tour. Mais dans les deux cas, les membres de l'homme moins bien disposés, au point de vue mécanique, que ceux du cheval ne peuvent soutenir le corps sans une action musculaire assez pénible, aussi la station fatigue autant qu'une marche de la même durée.

Dans le chapitre XVIII sur la position debout des animaux, du *De motu animalium*, Borelli utilise les propositions pour justifier le contrôle de ces positions érigées par des articulations en légères flexions (Proposition CXXIX), des muscles fléchisseurs plus courts que les muscles extenseurs, mais avec des contractions identiques (Proposition CXXX), une certaine tonicité musculaire de muscles spécifiques (Proposition CXXXI), mais aussi la position de la ligne de support, c'est-à-dire la ligne rectiligne joignant le centre de gravité du corps et son appui sur le sol est verticale (Proposition CXXXII). Cette dernière indication agence l'auteur sur l'étude approfondie du centre de gravité, sa localisation avec ses conséquences sur le calcul des forces développées par les membres inférieurs sur les appuis.

La plupart des mammifères ne sont point organisés pour se tenir debout sur deux pieds. Tout dans la disposition de leurs membres indique que l'appui doit se faire à la fois sur les quatre extrémités. En effet, leur corps ne peut être amené dans une direction rigoureusement verticale, leur bassin est trop étroit, les rayons des membres abdominaux sont trop fléchis les uns sur les autres, leurs pieds qui s'écartent difficilement, ne leur procurent pas une base de sustentation assez large pour qu'ils puissent prendre ou conserver longtemps l'attitude caractéristique de l'espèce humaine. Quelques-uns

³⁸⁶ Weber G., Weber E. *Mécanique des organes locomoteurs*. In Encyclopédie anatomique. Tome II. Ostéologie, Syndesmologie de Jourdan A.-J.-J. Paris : chez J.-B. Baillière, 1843.

Partie III. Chapitre 2. Localisation du centre de gravité

seulement, les singes, les ours, parviennent à la prendre momentanément, d'autres, tels que l'écureuil, la gerboise, le kangourou, s'accroupissent et se tiennent sur le train postérieur, enfin le chien, le loup et divers carnassiers peuvent s'asseoir sur la croupe et s'y maintenir à l'aide des membres antérieurs appuyés sur le sol.



Figure 46. Certains animaux tels que des chiens, singes et ours, peuvent se tenir droits comme les hommes. (Proposition CLXVII, Tab. XIII, Fig. 11, De motu animalium).

La station bipède des oiseaux s'effectue par un mécanisme spécial. Le corps de l'oiseau étant plus ou moins oblique, et le centre de gravité placé en avant des articulations coxo-fémorales, il faut pour que l'équilibre soit possible, ou que le corps se redresse et devienne presque vertical³⁸⁷, ainsi que chez les grèbes et les manchots, ou que les pieds se projettent assez en avant de manière à se situer sur la ligne de gravitation. Or, chez la plupart des oiseaux, le fémur est fortement fléchi sur le bassin et les tarses sont presque droits, les doigts très longs et écartés les uns des autres.

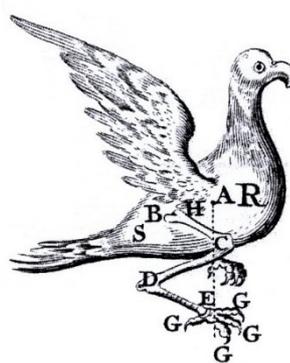


Figure 47. Borelli explicite comment les jambes des oiseaux diffèrent de celles des hommes et justifie ainsi pourquoi ils se tiennent et se déplacent sur leurs deux jambes différemment des hommes. Il évoque pour cela des différences dans : le nombre d'os, leurs configurations, la distribution et la structure des muscles, ainsi que le nombre d'articulations (De Motu Animalium, Chapitre XVIII, Proposition CXLIV).

De même que dans les mammifères, il y a dans les oiseaux des dispositions mécaniques qui viennent en aide aux puissances musculaires, et rendent la station la

³⁸⁷ Brehm A. E. *La vie des animaux illustrée*. Paris : [s.n.], 1870.

moins pénible que possible, elles sont relatives aux os et aux muscles eux-mêmes. D'abord le condyle externe du fémur, porte sur son milieu une arête en avant et en arrière de laquelle se trouve une excavation, le péroné, qui sert de point d'appui à ce condyle. Il est uni au fémur par un ligament élastique qui est tirailé toutes les fois que la jambe est à demi étendue ou à demi fléchie, tandis qu'il cesse de l'être sous l'influence d'une excavation, et l'y maintient par la tension des ligaments. C'est à cette espèce de ressort que les oiseaux doivent, en partie du moins, l'aptitude à rester si longtemps debout, même sur un seul pied ; mais il est évident qu'elle ne suffit pas à expliquer la persistance de la station, car elle ne paraît s'opposer en rien à la flexion exagérée de la cuisse sur le bassin et du tarse sur la jambe, flexion qui, de toute nécessité, doit être bornée, soit par des ligaments, soit par des muscles.

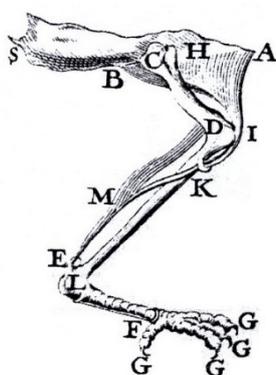


Figure 48. Borelli explicite mécaniquement que la flexion des jambes des oiseaux a comme conséquence la flexion des doigts facilitant ainsi l'attitude de l'oiseau. En effet, l'extrémité proximale CD du fémur est articulée dans la cavité cotyloïde C dans l'extrémité AB de l'os iliaque de l'oiseau. Le fémur est articulé avec le tibia DL au genou ID et le tibia est articulé avec le tarso-métatarse LF à l'angle de l'articulation E qui est surélevée. Les doigts FG sont attachés à F. Le principal muscle fléchisseur des doigts digastrique prend ses origines à l'extrémité de l'os iliaque à HC. Le tendon fort et rond est fixé à la rotule I chez quelques oiseaux, mais dans le cygne, l'aigle et le faucon, il présente une gaine qui passe dans une gorge creusée au genou I, elle traverse une boucle K, croise le tibia latéralement et arrive à l'extrémité postérieure distale du tibia. L'autre muscle fléchisseur des doigts prend son origine à l'extrémité distale D du fémur et à l'extrémité proximale du tibia. Leurs tendons se joignent à M avec celui du muscle digastrique et unis, arrivent en E. Ils passent la cheville dans une gaine cartilagineuse lisse et glissante vers le talon F où ils entrent dans une autre gaine ou canal aponévrose. Enfin, ils se subdivisent et arrivent aux bases G, G, G des griffes par de petits canaux tendineux près du sol. Il observe que, quand les articulations I et L sont en extension et les trois os CD, DL, FL sont alignés ou presque alignés, les tendons HIKEF sont relâchés et les doigts FG demeurent ainsi ouverts et en extension. Mais si l'os iliaque AB est comprimé et les articulations sont fléchies complètement de sorte que la tubérosité supérieure IC du fémur CD touche l'os iliaque AC, la partie supérieure du tibia DE touche la partie inférieure du fémur CC et la partie supérieure des tarso-métatarses EF touche la partie inférieure du tibia IL, alors les articulations du pied FG sont entièrement flexion. Les doigts sont fermés en force (De Motu Animalium, Chapitre XVIII, Proposition CXLIX).

3) Le centre de gravité quiddité de l'équilibre humain et animal

Pendant des millénaires, l'homme s'est tenu debout sans se poser de questions sur la machinerie qui lui permet cette posture. L'idée même d'une machine animale lui était étrangère, d'ailleurs. Mais lorsqu'il eut l'audace de constater que les corps célestes

étaient soumis aux lois de la mécanique, alors il se prit à penser son propre corps en termes de masses, d'accélération, de forces, d'équilibre.

La station de l'homme, en effet, n'est pas comme celle de beaucoup d'animaux, un état passif. Son corps est formé de la tête aux pieds de diverses brisures, qui non seulement sont mobiles les unes sur les autres, mais qui ne sont pas superposées de manière à rester continuellement en équilibre dans une même position verticale par le fait seul de leur poids. Il faut dès lors que des muscles étendus d'une de ces brisures à l'autre, faisant office de crampons, les y maintiennent par leurs contractions. Effectuer cette station est donc un des offices de la locomotion, et un objectif d'autant plus étendus que l'homme est susceptible de plusieurs espèces de stations, de la station sur ses deux pieds, sur un seul, sur les genoux, de la station assise, en un mot qu'il peut prendre des attitudes très variées.

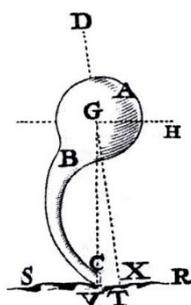


Figure 49. Borelli pour argumenter sur le centre de gravité utilise un corps lourdement chargé ABC de n'importe quelle forme est considéré. Ce corps se repose sur un plan horizontal RS à V. Une ligne droite GV est tracée de son centre de gravité G à l'appui V. Il affirme que, si GV est vertical, le corps ABC demeure debout dans la même position, mais, s'il existe un angle GVR même aigu, le corps nécessairement doit incliner vers R. Le centre de gravité est le point tel que si un corps pesant est suspendu en ce point il demeure immobile. Le point de suspension doit être sur la ligne selon laquelle la force et le mouvement de la pesanteur sont exercés. Cette ligne est verticale. Par conséquent, le corps ABC suspendu au centre de gravité G et appliquant la masse dans la direction d'un filin DG perpendiculairement à RS, demeure immobile dans cette position. Le corps pesant ABC est soutenu par le sol V le long de la direction verticale GV comme s'il était suspendu par une corde GD. En conséquence, le corps pesant ABC appuyé à V reste immobile. Mais, si l'angle GVR est aigu, ABC doit s'incliner vers R. GX est dessiné perpendiculairement à RS et le point X est entre V et R. Le corps AB est soutenu par le levier oblique GC depuis le centre de rotation où le point d'appui V et sa masse s'appliquent le long de GX vertical. Le corps AB quand il est soutenu par le levier incliné GC se trouve dans la même position que s'il était sur le plan GH perpendiculaire à GC. Le plan GH est incliné à l'horizontale du plan RS. Par conséquent, le corps AB doit rouler de haut en bas le long de ce plan GH. En fait, il doit tomber avec le levier GC, vers X. Ceci est vrai quand un corps pesant est en contact avec le sol par un simple point V. Si le support est important, tel que VT, alors le corps peut rester immobile dans différentes positions tant que la verticale tracée du centre de gravité G tombe à l'intérieur du support VT. Le corps s'inclinera dès que la perpendiculaire CX tombe en dehors du support VT. Cette Proposition CXXXII est fondamentale, car elle fait le lien entre la localisation du centre de gravité, sa ligne de projection sur la base de l'appui, sa fluctuation de positions, vitesses, accélérations selon les répartitions des masses des corps et donc des coûts énergétiques pour les contrôler. Les liens entre le centre de gravité et le centre de pression, les rendements mécaniques et les dépenses physiologiques pour maintenir l'équilibre ou se déplacer par sa rupture, peuvent être envisagés dans l'étude de la locomotion.

Un objet est en équilibre s'il ne subit pas de déformations et si aucune modification ne se produit dans son état de repos ou de mouvement : immobile, cet objet reste immobile ; en mouvement, il garde un mouvement rectiligne et uniforme ; son orientation dans l'espace, notamment, ne se modifie pas au cours du déplacement. La condition de l'équilibre d'un objet est que la résultante des forces agissant sur lui soit nulle.

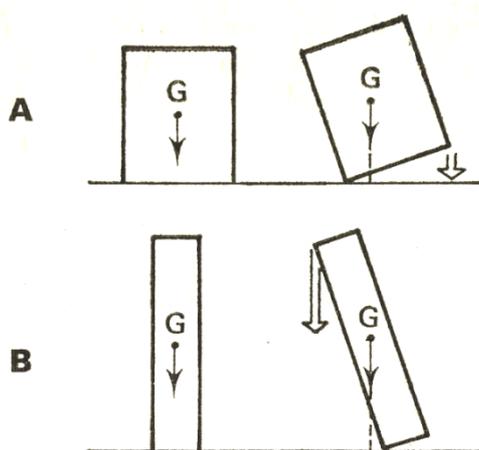


Figure 50. Équilibre stable (A) et instable (B) ; G : centre de gravité ; flèche noire : poids du corps ; flèche blanche : mouvement du corps qui a été déplacé de sa position d'équilibre. Dans le cas de l'équilibre stable, le corps écarté de sa position d'équilibre y revient sous l'action de la pesanteur. Dans le cas de l'équilibre instable, au contraire, le corps écarté de sa position d'équilibre s'en écarte encore plus et tombe sous l'action de la pesanteur (Extrait de Gribenski et Caston, 1973)³⁸⁸.

Supposons maintenant qu'il s'agisse d'un objet allongé et rigide, par exemple une règle. Il est difficile de faire tenir debout une règle posée sur l'une de ses extrémités. Cet équilibre, si on arrive à le réaliser, est précaire et il suffit d'un souffle pour provoquer la chute. En effet, un corps solide posé sur un plan horizontal est en équilibre si la verticale passant par son centre de gravité rencontre ce plan à l'intérieur du polygone de sustentation.

La verticale du centre de gravité est l'axe de gravité. Il définit la stabilité de la position du corps suivant sa hauteur et son point de chute dans sa base de sustentation réalisée chez l'homme par la position des pieds sur le sol. Si le polygone de sustentation est grand par rapport aux dimensions du solide, l'équilibre est en général stable. Lorsque le corps est écarté de sa position d'équilibre, il y est ramené par la pesanteur, si le polygone de sustentation est petit, l'équilibre est instable (à moins que le centre de gravité ne soit placé très bas, ce qui n'est pas le cas pour notre règle) : écarté de sa

³⁸⁸ Gribenski A., Caston J. *La posture et l'équilibre*. Paris, Presses universitaires de France, 1973.

position d'équilibre, le corps s'en éloigne plus encore sous l'action de la pesanteur, puis il tombe.

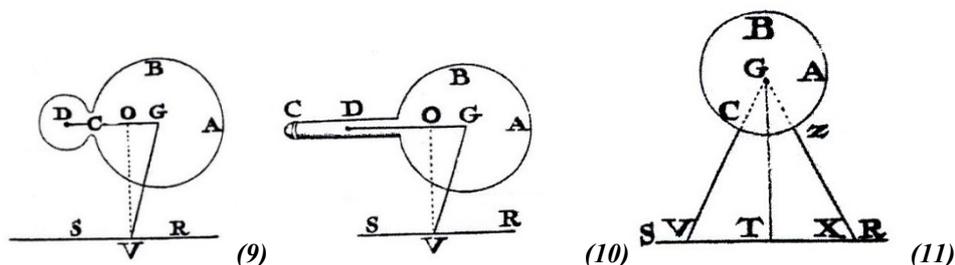


Figure 51. Borelli expose différentes manières d'empêcher la chute d'un corps pesant se tenant sur le sol quand la ligne d'appui n'est pas verticale. Une ligne de support GV du corps pesant ABC est tracée du centre de gravité G au contact avec le sol V et forme avec l'horizontale RS un angle aigu GVR . Il développe l'idée (Fig. 9) qu'un autre corps D est ajouté à C dans l'angle obtus GVS de sorte que le centre de gravité commun O des deux corps ABC et D soit sur la ligne droite GD et divise cette ligne dans la proportion inverse avec les masses des deux corps. Une ligne droite OV est tracée de O . Si cette ligne OV est perpendiculaire à RS , les corps ABC et D conservent indubitablement leur position identique. L' OV est la ligne de gravité des deux corps puisque les deux corps tendent à tomber suivant cette ligne verticale. Il note que la chute peut être empêchée sans ajouter une nouvelle masse en prolongeant la partie BC (Fig. 10), comme un bras humain tendu latéralement, de telle manière que le centre de gravité de la pièce BC soit déplacé à D , éloignant le point G par rapport à sa position initiale. Par conséquent, le centre commun de gravité de la figure allongée ABC est O , sur la verticale OV de la ligne de gravité, comme dans le premier exemple. Enfin, sans changer la forme du corps ABC (Fig. 11), on peut empêcher la chute en additionnant d'un support XZ qui forme un triangle GVX avec la ligne d'appui GV de sorte que la verticale GT tirée du centre de gravité G entre coupe la base XV à un point quelconque T entre les points X et V (Proposition CXXXIII. Tab. X, Figs. 9, 10, 11).

Un homme debout les pieds rapprochés se trouve dans les conditions physiques d'un équilibre instable, cependant, il ne tombe pas, même si son corps se trouve un peu écarté de la position verticale, en particulier s'il est poussé par du vent, l'équilibre réalisé est donc stable. Un homme qui nage garde la tête hors de l'eau et son corps conserve toujours une même orientation, malgré la pesanteur qui tend à modifier cette orientation, malgré les mouvements de l'eau qui risquent constamment de le faire basculer et tourner dans tous les sens.

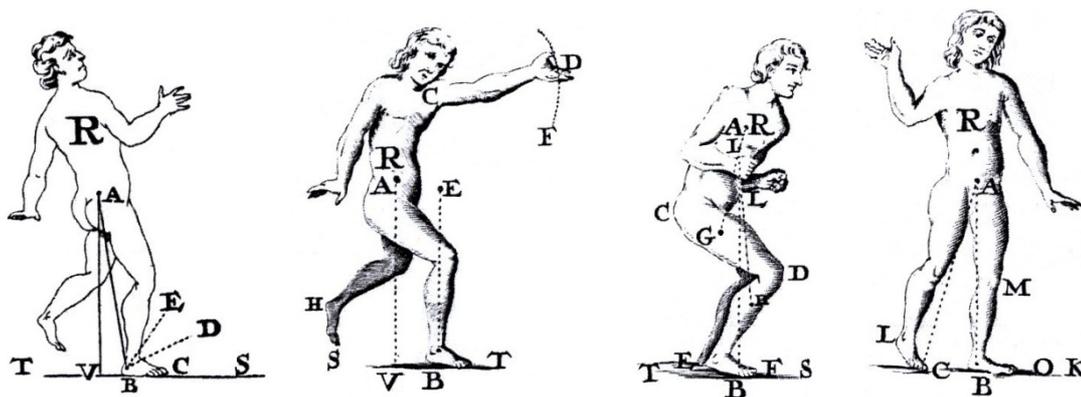


Figure 52. Figures qui argumentent les explications des propositions du chapitre XVIII sur la position debout des animaux dans le *De motu animalium* de Borelli.

Le centre de gravité d'un corps est le point d'application de la pesanteur à ce corps, et la ligne de gravité est la verticale passant par le centre de gravité. Le polygone de sustentation (ou base de sustentation) d'un corps solide reposant sur un plan, représente le plus petit contour convexe qui renferme tous les points d'appui du corps. Dans le cas d'un homme reposant sur ses deux pieds non joints, la base de sustentation comprend, outre les deux semelles, la région du plan située entre elles. Dans le cas d'un quadrupède, la base de sustentation est un rectangle dont les sommets sont les points d'appui des quatre pattes.

Parmi les facteurs du milieu ayant influencé l'évolution morphologique des êtres vivants, il en est un, la gravité terrestre, dont les effets sont très étroitement liés à l'utilisation par l'homme de la station érigée. Quelle relation logique relie la pesanteur terrestre, et la morphologie définitive de l'homme, seul primate à n'utiliser que ses membres postérieurs pour se mouvoir ? Des éléments de réponse à cette question peuvent être fournis par une étude des caractéristiques inertielles du corps humain et en particulier par la détermination de la position du centre de gravité ou centre de masse. Lorsqu'à partir des données obtenues, on approfondit les relations qui s'établissent entre la position du centre de gravité du corps humain et les éléments biomécaniques entrant directement en jeu dans le maintien de la posture érigée, la particularité de sa situation est remarquable.

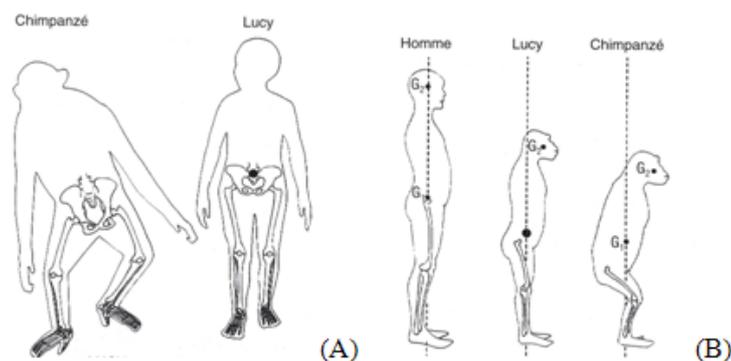


Figure 53. Scénario possible de l'évolution de l'équilibre bipède. Cette figure composite présente la lignée des hominidés, d'*Australopithecus* à *Homo erectus*. (A) Silhouette d'un chimpanzé (en positions bipède) et de face avec l'emplacement du centre de gravité du corps en regard de la silhouette et de la reconstitution du squelette de Lucy (Éthiopie, Hadar, 3 millions d'années). La morphologie du bassin permet un meilleur équilibre du tronc sur les membres inférieurs chez celle-ci. (B) Silhouette de profil d'un homme, de Lucy et d'un chimpanzé avec la matérialisation de la verticale de gravité du corps. G1 : centre de gravité du corps ; G2 : centre de gravité de la tête.

Une répartition harmonieuse des différentes masses segmentaires entraîne, chez l'homme, une localisation pelvienne du centre de gravité au niveau de la deuxième ou troisième vertèbre sacrée, selon l'inclinaison posturale du sacrum. Cependant, au-delà de cette simple localisation anatomique, quelle signification fonctionnelle et, compte tenu de la structure anatomique des éléments squelettiques avoisinants, quelle raison mécanique peut-on rattacher à un tel état de fait ? Le centre de gravité global se situe au voisinage direct de la zone de balayage de l'intersection des axes fonctionnels des cols fémoraux. Cette disposition anatomique et mécanique, présente une importance réelle, car elle définit les conditions optimales de solidité et d'équilibre au niveau des arcs-boutants que sont les cols des fémurs. Ainsi, la position, particulière chez l'homme, du centre de gravité en regard des deuxième et troisième vertèbres sacrées, symbolise une propriété spécifique de ce primate érigé.³⁸⁹

4) La détermination expérimentale du centre de gravité

La pesanteur intervient à tout moment dans la statique et la dynamique. Elle favorise les mouvements dirigés dans son sens qu'elle peut même provoquer et s'oppose à ceux qui sont dirigés en sens inverse. En général, dans la vie courante, elle constitue notre principale force. Toutes les molécules du corps sont pesantes, elles représentent de petites forces parallèles dirigées verticalement, elles peuvent se composer partiellement

³⁸⁹ Ignazi G., Pineau H. « Centre de gravité et moments d'inertie du corps humain : historique, mesure, signification fonctionnelle et évolutive (Center of gravity and moment of inertia of the human body : History, measurement, functional and evolutive significance). » *Biométrie humaine et anthropologie. Biométrie des ceintures et des membres. Colloque de la Société de Biométrie Humaine, Paris, 2000, vol. 18, n° 1-2, p. 29-41.*

pour former le poids du corps tout entier. Il est commode de représenter ce poids par une seule force appliquée en un point idéal : le centre de gravité. Le centre de gravité du corps est le point d'application de la résultante de toutes ses parties.

Dans le corps humain où la force est irrégulière et la densité variable dans ses parties, le centre de géométrie et le centre de gravité ne coïncident pas. Le centre de gravité n'occupe pas une position fixe, celle-ci varie avec la force du corps, c'est-à-dire avec la position relative de la tête, du tronc et des membres. La problématique de la localisation et de l'étude du centre de gravité de l'homme ou de l'animal se trouve au cœur de l'analyse de la locomotion puisque c'est à son niveau que la fluctuation de l'influence de l'ensemble des forces peut symboliquement se représenter et se résumer par son mouvement.

1. La méthode Borélienne

Borelli avait assimilé l'importance de la localisation du centre de gravité pour mieux cerner l'étude du mouvement. Il le localise avec une méthode simple qui sera ensuite utilisée par d'autres avec un appareillage plus sophistiqué. Il évoque ce principe dans sa proposition CXXXV du chapitre XVIII : « *Un homme dénudé est étendu rectiligne sur une planche horizontale AB, on place le milieu I de celle-ci sur le bord d'un appui prismatique. Le centre de gravité de la table se trouve sur la verticale de ce bord. La table est en équilibre quand le point C entre les fesses et le bassin du sujet se trouve sur la table juste au-dessus de l'arête de l'appui. Par conséquent, le centre de gravité de l'homme gisant allongé se localise en C.* » Borelli utilise simplement la technique du levier à l'aide d'un support prismatique pour situer le centre de gravité.

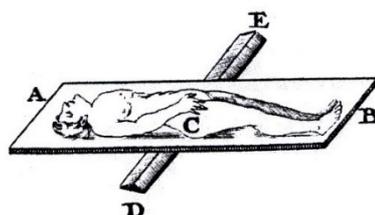
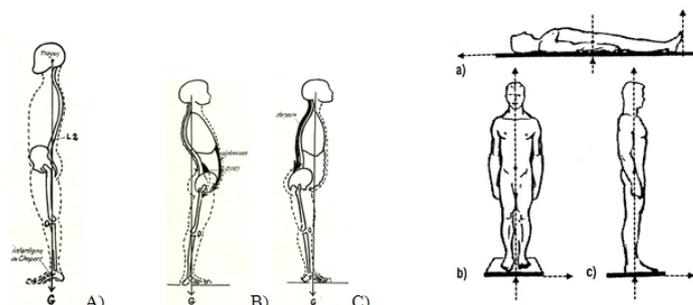


Figure 54. Procédé utilisé par Borelli pour localiser le centre de gravité (Tableau X, Fig. 12).

Le centre de gravité, encore appelé centre de masse, est un concept qui permet de traiter plus facilement des problèmes mécaniques. Pour cela, on fait l'hypothèse que la masse entière est située en ce point. La notion de centre de gravité est couramment utilisée. Le centre de gravité d'un objet dont la matière est uniformément répartie se trouve en son centre géométrique. Par contre, en ce qui concerne les objets dont la

Partie III. Chapitre 2. Localisation du centre de gravité

matière n'est pas répartie uniformément, le centre de gravité est déporté vers la partie de l'objet qui contient le plus de matière.



D) Figure 55. A) Ligne de gravité du corps humain. La station debout est une position voisine de l'équilibre stable, elle demande peu d'efforts musculaires : les anciennes théories attribuant à la contraction musculaire le maintien de la station debout sont abandonnées. On pense aujourd'hui, en général, que l'équilibre est maintenu surtout par des actions ligamentaires dirigées aidées, le cas échéant, par de simples contractions toniques (tonus musculaire). La connaissance de cette ligne de gravité permet de déterminer théoriquement le déséquilibre des segments et le mécanisme ligamentaire ou musculaire qui concède leur maintien. B) Lordose par insuffisance dorsale, mise au repos des dorsaux, C) Lordose par insuffisance abdominale. D) Position du centre de masse corporelle par rapport a) au pied (hauteur), b) au plan frontal, c) au plan sagittal.

Il est intéressant de noter que la localisation du centre de gravité du corps humain en posture orthostatique est souvent à proximité du niveau de la seconde vertèbre sacrée ou encore à 56 à 57% de la taille chez l'homme et à 55% chez la femme. En position droite le centre de gravité se trouve à un peu moins de 60% de la hauteur totale du corps à partir du sol, sur la ligne médiane, dans le même plan frontal que le centre des cavités cotyloïdes, légèrement au-dessus de la ligne théorique qui relierait le centre des deux cavités cotyloïdes, en face de la deuxième vertèbre sacrée. Le centre de gravité varie suivant l'âge, parce que les proportions des segments corporels varient successivement et indépendamment les uns des autres. Plus l'enfant est jeune, plus son centre de gravité est relativement élevé.

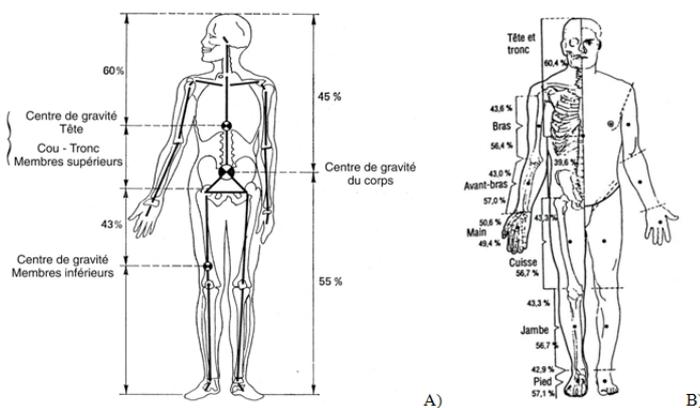


Figure 56. Les centres de gravité du corps humain. A) Le centre de gravité de tout le corps (CG) s'accompagne de centres répondant aux différentes parties du corps, souvent mobiles de manière indépendante les uns des autres. B) Position des centres de masse segmentaires exprimée en pourcentage de la longueur du segment ?

2. Le lit de sangle de Demenÿ

La méthode de Borelli sera perfectionnée par Georges Demenÿ collaborateur d'Étienne-Jules Marey pour mesurer le déplacement du centre de gravité suivant l'axe du corps dans les différentes attitudes avec des bras et des jambes. Il l'explicite le 10 octobre 1887 dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences sous le titre : *Étude des déplacements du centre de gravité dans le corps de l'homme* :

« La position du centre de gravité dans le corps humain varie, il est vrai, à chaque mouvement des membres [...] nous avons construit un instrument de mesure, qui donne facilement, pour une attitude quelconque, la position du centre de gravité dans le corps de l'homme. Cet instrument se compose d'un lit de sangle pouvant osciller sur des couteaux, autour de deux axes horizontaux et rectangulaires, constituant une suspension de Cardan très mobile. Pour déterminer la quantité dont le centre de gravité du corps se déplace dans le plan vertical et dans les deux sens, vertical et horizontal, quand on passe de l'attitude droite à une autre attitude, de la marche, de la course ou du saut, on opère de la manière suivante : On place le sujet sur le lit dans l'attitude allongée, et couché sur le flanc, de façon que le centre de gravité soit sur la verticale passant par le croisement des deux axes de suspension. Ceci se voit facilement au moyen d'un long index oscillant avec tout le système, au-devant d'un repère. Le sujet en expérience prend ensuite une attitude désignée ; l'index est dévié : on rétablit l'équilibre au moyen de poids marqués, placés sur le cadre du lit et dont le moment est connu. Si P est le poids du corps, p le poids additionnel agissant au bout d'un bras de levier de $1m$, la quantité dont se déplace le centre de gravité dans le corps en passant de l'attitude allongée, comme celle de la station à une attitude quelconque, sera représentée par le rapport p/P . Cela aura lieu pour les deux sens rectangulaires déterminés par la position de l'homme sur le lit et par la direction des deux axes de couteaux de suspension. »³⁹⁰

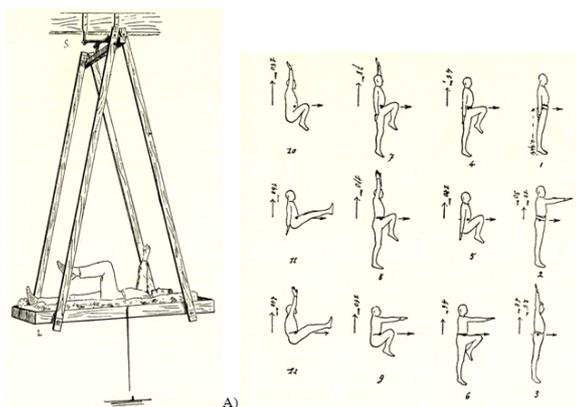


Figure 57. A) Lit suspendu à cardan pour la détermination de la position du centre de gravité dans le corps dans différentes attitudes. B) Attitudes que l'on rencontre dans les différentes phases du saut où sont indiqués les déplacements correspondants du centre de gravité en millimètres. (Demenÿ G. *Étude des déplacements du centre de gravité dans le corps de l'homme. Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 10 octobre 1887).

³⁹⁰ Demenÿ G. « Etude des déplacements du centre de gravité dans le corps de l'homme pendant les actes de la locomotion. » Les comptes rendus de l'Académie des Sciences le 10 Octobre 1887, p. 1-2.

3. La méthode de la double pesée

D'autres méthodes poursuivent l'idée initiale avec une instrumentation plus poussée, c'est le cas de cette approche. La démarche est simple et se base sur une double pesée du sujet placé dans l'attitude étudiée. Un rapport de poids et de distances permet de localiser l'axe de gravité par rapport à un point connu. On détermine tout d'abord le poids total du sujet. Ensuite, on pose une planche sur la bascule, comme le montre la figure et ensuite le sujet se place dans la position à examiner.

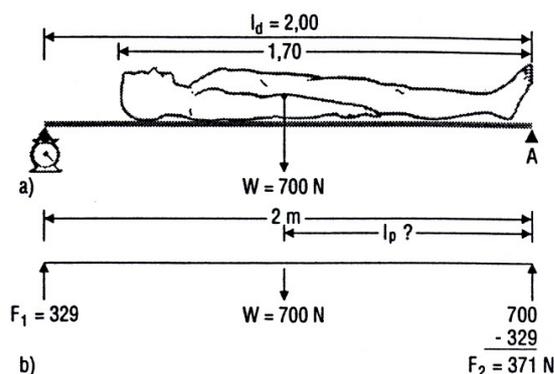


Figure 58. Pour localiser la position du centre de masse d'un individu, on fait appel au principe du levier. Le sujet se couche, le dos collé contre une planche étroite et longue de 2 m tel qu'illustré à la figure. Ce système représente un levier inter résistant. Le poids du corps (la résistance) est placé entre le point d'appui situé à l'extrémité podale et la balance qui enregistre la charge sous la planche. L'effet de la planche est négligé dans le but de simplifier les calculs. Notre sujet pèse 700 N et a une taille de 1,70 m. Comme le centre de masse n'est pas situé au milieu du corps, la balance indique une charge de 329 N. Par conséquent, la force au point d'appui, A, de la figure est de 371 N (700 N - 329 N).

L'opération mathématique pour estimer la force au point d'appui correspond à l'application de la première condition d'équilibre : la somme des forces est nulle. Comme le tout est en équilibre, la sommation des moments (seconde condition d'équilibre) est aussi égale à zéro. Les moments sont pris au point d'appui, A et sont positifs pour une rotation horaire. On cherche la distance I_p , représentant la position du centre de masse par rapport aux pieds.

Moment de la force (balance) - Moment dû au poids = 0

$$I_d \cdot 329\text{N} - I_p \cdot 700\text{N} = 0 \qquad 2,00\text{m} \cdot 329\text{N} - I_p \cdot 700\text{N} = 0$$

$$I_p = (2,00 \text{ m} \cdot 329) / 700$$

$$I_p = 0,94 \text{ m}$$

Ainsi le centre de masse de notre sujet se situe à 0,94 m du point d'appui podal. Cela représente 55 % de la taille de la personne couchée sur la planche (0,94 m / 1,70 m x 100).

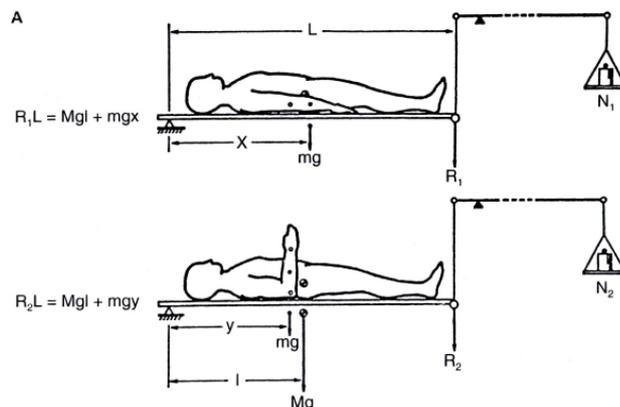


Figure 59. Méthodes de mesure directe des constantes biomécaniques du segment avant-bras + main. A. Détermination de la position du centre de gravité. On effectue deux pesées du sujet, d'abord l'avant-bras le long du corps, puis vertical. On écrit le théorème des moments dans les deux cas, ce qui permet d'obtenir la formule reportée sous la figure. Dans celle-ci, e est la distance, à l'axe du coude, du centre de gravité du segment avant-bras + main, dont la masse est m . La signification des autres symboles est indiquée sur la figure. Le calcul de e est indiqué dans l'encadré (Cnockaert J. C, Pertuzon E. « Détermination des constantes biomécaniques d'un segment corporel (avant-bras plus main). II. Mesure de la position du centre de gravité. » *Le Travail Humain*, 1970, 33 (3-4) : 335-340).

L'étroitesse de la surface d'appui et le positionnement du centre de gravité placé au niveau de la deuxième vertèbre sacrée ont pour conséquence de rendre précaire la stabilité de la posture érigée. Un très faible déplacement du support sur lequel reposent les pieds du sujet nécessite une réaction posturale qui corrige l'effet de la perturbation et rétablit l'équilibre.

Il résulte des premières études sur la station debout de Gallien dans le *De motu musculorum* à l'*Opera omnia anatomica et physiologica* de Fabrice d'Acquapendente, le maître de Harvey, que la posture est considérée comme un phénomène actif. Mais c'est en localisant le centre de gravité et en traçant dans le *De motu animalium* la verticale de la gravité du corps de l'homme, que Borelli en 1679 a proposé indirectement que les lois de la mécanique ne soient pas réservées aux seuls corps célestes. Dès cet instant, posture et équilibre se sont trouvés reliés dans l'esprit des hommes avec l'application du modèle mécanique entraînant le développement d'un regard sur le corps qui mesure, cherche des repères, développe des normes dont on accepte peu les variations.

Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

Au XVII^e siècle, Santorio Santorio étudie la physiologie humaine sur un plan quantitatif comme personne ne l'a envisagé. Élève de Girolamo Fabrizi d'Acquapendente et de Galilée, il investit la physiologie expérimentale avec opiniâtreté. Sans présumé, il envisage sur lui-même les expérimentations qu'Erasistrate avait effectuées sur des oiseaux, plusieurs siècles avant. Par l'intermédiaire d'une balance de son invention, il mesure et compare les apports et les pertes de poids chez l'homme. Les mesures réalisées plusieurs fois par jours, plusieurs jours de suite, lui permettent d'évaluer ce qui était absorbé, ce qui était perdu et ce qui était transpiré. Il en conclut qu'une partie des produits de la digestion était perdue au cours d'une « transmission imperceptible », une perspiration insensible comme Erasistrate l'avait déjà remarqué pour expliquer ce phénomène.

On apprendra plus tard que la respiration avec rejet de CO₂ constitue une autre forme de perte de substance carbonée. La balance se révèle un exemple d'instrument de mesure physiologique utilisé pour une expérimentation biologique planifiée tout comme le thermomètre à mercure.



*Figure 60. Expérimentation sur le métabolisme réalisée en 1629 par Santorio Santorio.*³⁹¹

Plus d'un siècle plus tard, il sera reconnu, que l'organisme animal est le siège de transformations énergétiques continues. Ainsi, l'énergie chimique potentielle est transformée en travail mécanique lors de l'exécution d'un mouvement. Le médiocre rendement du moteur animal³⁹² fait

³⁹¹ Santorio Santorio. *Medicina Statica : Being the Aphorisms of Sanctorius*, translated into english with large explanations. Publié par Printed for W. and J. Newton in Little-Britain, A. Bell at the Cross-Keys in Cornhill, W. Taylor at the Ship in Pater-Noster-Row, and J. Osborn at the Oxford-Arms in Lombard-street, 1720, p. 10.

³⁹² En principe 23% de l'énergie chimique consommée par le muscle chez l'homme sont restitués sous forme d'énergie mécanique, alors que les 77% restants sont perdus, c'est-à-dire dissipés sous forme de chaleur. Le rendement varie d'un groupe musculaire à l'autre et d'un sujet à l'autre, cependant, il dépasse rarement 25%. Guenard H. *Physiologie humaine*. Rueil-Malmaison : Ed. Pradel, [1990], 2001, p. 545.

que la production de travail mécanique s'accompagne de la dégradation d'une partie de l'énergie totale dépensée, sous forme de chaleur. L'analyse biomécanique permet d'évaluer le travail et l'énergie mécanique correspondante, dont l'action des muscles constitue une importante composante. En revanche, seule la consommation d'oxygène permet de mesurer l'énergie métabolique, c'est-à-dire la dépense totale d'énergie, nécessaire pour calculer le rendement. En d'autres termes, connaître l'énergie mécanique ne suffit pas pour optimiser les performances motrices.

1) Le calcul de la dépense énergétique dans la locomotion

L'étude des dépenses énergétiques est un élément essentiel dans la compréhension des locomotions physiologiques. Le métabolisme basal correspond à la dépense énergétique de base de l'animal au repos autrement dit le coût minimal de vie. En plus de ce métabolisme basal, quand un animal effectue une activité, il doit dépenser de l'énergie pour que ses muscles puissent produire des mouvements. L'activité musculaire la plus facile à quantifier est la simple locomotion, l'activité routinière utilisée pour chercher la nourriture, pour se reproduire ou pour fuir un prédateur.

Dans ce cas, le coût métabolique de la locomotion constitue la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer une unité de masse sur une unité de distance. Elle s'exprime généralement en kilocalorie par kilogramme de poids et par kilomètre parcouru, et peut être mesurée quand sa valeur dépasse celle des conditions basales du repos. C'est alors que les mesures de la consommation de l'O₂ et de la production du CO₂ se réalisent pendant la locomotion, tandis qu'un animal se déplace sur un tapis roulant à vitesse et inclinaison déterminées, nage dans un container à flux d'eau où vole dans un tunnel ventilé. Dans ces différents cas, la quantité de gaz échangée et évaluée peut se convertir en énergie dépensée.

Quand le mouvement débute, l'augmentation de la dépense d'énergie métabolique a lieu pour une même variation de vitesse. La vitesse de consommation d'O₂ augmente linéairement quand la vitesse du mouvement augmente. La même relation existe entre le métabolisme de base et le métabolisme maximum fourni pendant un exercice intense. La vitesse de la locomotion à laquelle le maximum du métabolisme aérobie culmine est appelée la vitesse maximale aérobie. Quand un animal dépasse cette valeur, l'activité supplémentaire est assurée par le métabolisme anaérobie qui conduit à la production glycolytique d'acide lactique. Quand cette production croît, la dette d'oxygène augmente. Le métabolisme anaérobie est aussi associé à la fatigue musculaire (due à l'épuisement des réserves chimiques en énergie) et à l'acidose

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

métabolique qui peut interrompre le métabolisme, si elle atteint des valeurs élevées. À cause de ces événements, le métabolisme anaérobie s'avère peu adéquat pour assurer une activité musculaire soutenue. Ainsi, seule une locomotion restant au-dessous de la vitesse maximale aérobie peut être supportée longtemps chez certains groupes d'animaux.

La relation entre le travail net produit pendant la locomotion et la conversion de l'énergie brute, qui sert à la contraction des muscles, se complique de divers facteurs qui ne sont pas encore suffisamment bien maîtrisés. Néanmoins, nous savons qu'une certaine quantité de l'effort musculaire produit au cours de la locomotion ne contribue pas directement au mouvement. Certaines contractions musculaires maintiennent les membres dans une position donnée. Une grande partie de l'énergie musculaire sert à compenser l'effet de la gravité sur le corps ou à absorber des chocs et encore à ajuster les mouvements des membres pendant la contraction des muscles antagonistes.

La locomotion représente un processus coûteux en énergie. Plusieurs généralisations possibles se présentent pour établir une relation entre le coût total de l'énergie de la locomotion selon la taille et la vitesse d'un animal. La vitesse de consommation en O_2 qui s'ajoute à celui du métabolisme basal, augmente linéairement avec la vitesse. Il convient de noter pourtant que l'augmentation de l'énergie utilisée par unité de temps et par unité de poids, pour une augmentation donnée de la vitesse, est moins importante pour les gros animaux que pour les petits. En effet quand le coût de la locomotion est représenté en considérant l'utilisation d'énergie par gramme de tissu par kilomètre en fonction de la masse du corps, les gros animaux dépensent nettement moins d'énergie pour se mouvoir, pour une masse donnée et sur une distance donnée. La moins bonne efficacité énergétique dans la locomotion des petits animaux résulte en partie d'une faible efficacité due à la contraction rapide des muscles.

La relation entre la vitesse et le coût de la locomotion est complexe. Quand la vitesse de la course augmente, chez un quadrupède par exemple, le coût du métabolisme diminue pour une distance donnée parcourue. Ceci résulte du fait que les dépenses énergétiques qui ne sont pas liées à la locomotion s'ajoutent progressivement à la dépense totale d'énergie. Quand la vitesse continue de croître, les animaux qui nagent ou courent ou volent subissent une inévitable augmentation du coût énergétique quand ils atteignent leurs vitesses maximales de déplacement. La représentation décrivant la vitesse en fonction du coût énergétique a typiquement une forme en U. Le coût de la locomotion diminue d'abord

rapidement quand la vitesse augmente, puis il s'amplifie lorsque la vitesse continue de s'élever.

Une exception à cette courbe en U existe chez les bipèdes sauteurs, comme les kangourous et les wallabies. Aux faibles vitesses, la consommation de l'O₂ augmente linéairement chez le wallaby aussi bien que chez un quadrupède de même taille. Aux vitesses modérées ou élevées, les wallabies peuvent encore augmenter leur vitesse sans accroître leur consommation d'oxygène. Bien que cela paraisse impossible, ce résultat s'obtient pourtant grâce à l'utilisation des puissantes pattes postérieures pour sauter ; en effet, ces pattes stockent l'essentiel de l'énergie cinétique nécessaire pour que la masse de l'animal s'élève à chaque extension des pattes.

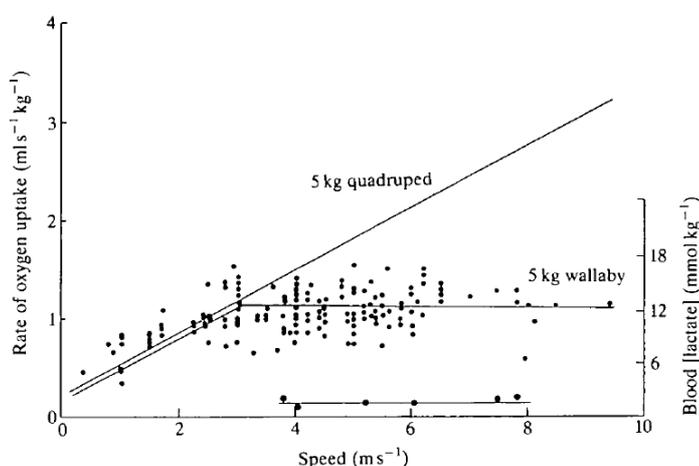


Figure 61. Graphique qui exprime selon l'élévation de la vitesse de déplacement ($m \cdot s^{-1}$) le taux de consommation d'oxygène en $ml \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$, petits points noirs) et le taux de lactate sanguin ($mmol \cdot kg^{-1}$, grands points noirs). Les données montrent que les animaux bipèdes qui sautent, tels que les Wallabies et les kangourous peuvent augmenter leur vitesse sans accroître leur consommation d'oxygène. Des quadrupèdes et des Wallabies de mêmes tailles présentent d'abord une augmentation linéaire de leur consommation d'oxygène quand la vitesse augmente. Pourtant, quand les wallabies passent en locomotion bipède, leur consommation d'oxygène n'augmente plus quand la vitesse augmente encore. Le fait que le lactate sanguin reste au même niveau indique que les vitesses plus élevées ne sont pas obtenues en augmentant le métabolisme anaérobie selon Baudinette (1991).³⁹³

2) La théorie du stockage et de la restitution énergétique

L'exemple le plus démonstratif qui expose le rôle de l'énergie potentielle élastique musculaire au cours du geste naturel se révèle dans la locomotion du kangourou. Aux vitesses de déplacement supérieures à environ $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la relation entre la consommation d'oxygène et la vitesse de déplacement montre une rupture de pente qui traduit un rendement

³⁹³ Baudinette R. V. The energetic and cardiorespiratory correlates of mammalian terrestrial locomotion. *The journal of experimental biology*, 1991, 160, 209-231.

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

accru. Ainsi, selon Proske (1980)³⁹⁴, la modification du type de locomotion qui intervient au-delà de ce seuil de vitesse permet à l'animal de solliciter de manière optimale le processus de stockage - restitution de l'énergie potentielle élastique au niveau des muscles des membres inférieurs et de la queue. Cette « économie » se traduit donc par une demande métabolique diminuée consécutive aux conditions particulières de mobilisation du muscle en cycle étirement - détente. Au cours de la phase excentrique d'étirement, un muscle activé est susceptible de stocker une énergie potentielle qui peut être restituée en partie lors de la phase concentrique, qui succède³⁹⁵. Cette énergie mécanique supplémentaire, provenant d'une autre origine que la dégradation de l'énergie chimique en énergie mécanique optimise le déplacement du kangourou.

Le phénomène de stockage d'énergie élastique qui se produit dans les éléments élastiques des membres s'avère particulièrement important dans la course et le saut. Dans l'observation des bonds d'un kangourou, plus l'animal saute haut à chaque bond, plus sa vitesse augmente. Quand les pattes prennent appui sur le sol, davantage d'énergie se transfère dans les composantes élastiques des membres. Il y a ainsi plus d'énergie fournie pendant le rebond au moment où les pattes vont se détendre à nouveau pour le bond suivant. Il y a peu d'animaux terrestres qui bondissent réellement, mais le concept de la réserve d'énergie élastique est important quand on regarde les changements d'allure d'un cheval (marche, trot, galop). En changeant d'allure pour prendre une vitesse adéquate, les animaux améliorent leur efficacité et évitent de produire sur les muscles des pattes des efforts qui pourraient être dangereux.

Si un poney trotte sur un tapis roulant à une vitesse où il devrait normalement être au galop, ou inversement, s'il galope alors qu'il pourrait être simplement au trot ; dans tous les cas, l'animal dépense plus d'énergie, que s'il pouvait choisir spontanément l'allure correspondant à la vraie vitesse. L'allure optimale résulte de mouvements relatifs de l'énergie stockée dans les composantes élastiques (comme les tendons) des membres au moment du changement de rythme locomoteur. Par exemple, il n'y a que peu d'énergie stockée pendant la marche, mais il y en a un peu plus pendant le trot. Quand l'animal galope, tous les éléments musculaires impliqués stockent de l'énergie élastique. Finalement, la moitié du travail négatif réalisé pour stocker de l'énergie pendant l'étirement des muscles se retrouve sous forme de chaleur ; le reste est stocké dans l'énergie élastique au niveau des ponts transversaux, du

³⁹⁴ Proske U. Energy conservation by elastic storage in kangaroos. *Endeavour*, 1980, 4, p. 148-153.

³⁹⁵ Cavagna G. A., Kaneko M. Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology London*, 1977, 268, p. 467-481.

réticulum sarcoplasmique, et des lignes Z des muscles et dans les tendons. Seule l'énergie élastique stockée est disponible pour le rebond et seuls 60 % à 80 % de cette énergie pourra se libérer. L'énergie convertie en chaleur ne peut être utilisée sous forme d'énergie mécanique dans les tissus vivants.

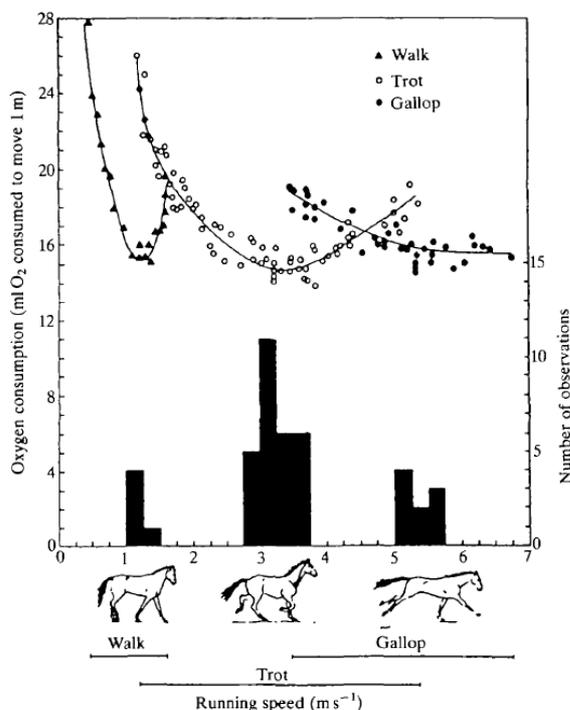


Figure 62. Selon le nombre d'observations, représentation de la consommation d'oxygène (en ml O₂ par mètre) du cheval en fonction de ses différentes allures marche, trot, galop (Extrait de Baudinette, 1991).³⁹⁶

La vitesse de l'utilisation d'énergie pendant les diverses formes de locomotion augmente avec la vitesse, en effet en changeant le rythme de la marche, de la course, du saut, du trot, les animaux terrestres peuvent augmenter leur efficacité. Celle-ci est obtenue quand l'énergie à la fin d'une enjambée est stockée sous forme élastique pour être libérée à l'enjambée suivante, un peu comme un kangourou qui saute.

3) La gestion de l'énergie dans la théorie de la coévolution³⁹⁷

Les performances animales et humaines consistent, dans un temps déterminé, à produire une certaine quantité d'énergie mécanique. Vouloir baser une rationalisation des mouvements sans tenir compte de la relation entre l'énergie développée et le temps où elle est produite se révèle une erreur physiologique fondamentale. En effet, une genèse

³⁹⁶ *ibid.*, Baudinette R. V. 1991.

³⁹⁷ Reichholf J. H. *L'émergence de l'homme : l'apparition de l'homme et ses rapports avec la nature*. Traduit de l'allemand par Jeanne Etoré-Lortholary. Paris, Flammarion, 1991 ; *L'émancipation de la vie*. Traduit de l'allemand par Jeanne Etoré-Lortholary. Paris : Flammarion, 1993.

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

commune nous relie à l'ensemble des êtres vivants, car la locomotion plus exactement la course fut une affaire de vie ou de mort.

Par exemple, la gazelle d'une vitesse maximale de course de 75 km.h^{-1} , ne doit sa survie qu'à son temps de réaction de quelques dixièmes de seconde et à la durée de sa course-poursuite face au guépard dont la pointe de vitesse se situe à 120 km.h^{-1} . La course équivaut à un coût énergétique qui puise dans des filières énergétiques spécifiques de type aérobie ou anaérobie. Dans ce contexte survivent les plus aptes, les plus capables ou les meilleurs, parfaitement évoqué par Charles Darwin quand il emploie l'expression « *survival of the fittest* ». Il serait sans doute plus juste de parler de vitesse optimale que maximale pour survivre.

Mais ce qui se révèle beaucoup plus important que la vitesse, c'est la conversion, réalisée avec le meilleur rendement possible, de l'énergie absorbée ou stockée en locomotion. L'énergie transformée en mouvement par les muscles de l'animal provient presque exclusivement de la combustion de sucre qui se produit au cours du métabolisme de la musculature. Le glucose constitue la base énergétique de la fibre musculaire et donc de la locomotion, de loin le meilleur fournisseur d'énergie, car il n'a pas besoin d'être transformé. C'est à partir de sa décomposition qu'il contribue à la formation de composés de phosphate de créatine, matière albumineuse qui constitue la molécule ATP (adénosine-triphosphate) indispensable à la contraction et au relâchement de la fibre musculaire. Ce type de relation montre l'étroite implication entre le métabolisme énergétique et la locomotion.

Un animal déconnecte la dépense énergétique pendant les périodes défavorables pour maintenir l'équilibre entre les entrées et les sorties, car un mouvement selon son intensité s'accompagne d'une forte dépense d'énergie. Certains animaux migrent pour éviter certains environnements dans lesquels la nourriture devient rare et où les températures sont trop faibles. Le coût de la migration varie avec la nature de l'environnement. En effet, le vol est bien moins coûteux en énergie par unité de distance que la marche ou la course, ou même que la nage. Le bilan du processus évolutif chez les animaux a donné de nombreux exemples d'adaptation à la survie dans des habitats très variés. Ces exemples sont des variantes de l'organisation des multiples composants qui ont conduit à l'immense panoplie des formes de vie.

La survie d'un animal dépend souvent de l'affectation et de la quantité d'énergie utilisée. Des animaux différents utilisent des stratégies différentes. Les mammifères par exemple ont un important renouvellement de l'énergie qui leur impose de rechercher régulièrement et fréquemment leur nourriture. Au contraire, chez les reptiles, le renouvellement de l'énergie est

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

plus modéré et ils peuvent survivre en utilisant moins d'énergie. Différents environnements favorisent différentes stratégies à divers instants. Par exemple, les reptiles semblent être avantagés dans les environnements désertiques avec peu d'eau et de nourriture pendant plusieurs jours, les mammifères sont au contraire plus à l'aise pendant la fraîcheur des nuits du désert. Ces derniers dépensent de l'énergie pour garder une température corporelle élevée et constante. Ils ont donc besoin de plus de nourriture, mais ils peuvent vivre dans le froid nocturne.

Dans cette lutte entre le chasseur et le poursuivi il existe une interaction où « *Les améliorations qui se produisent chez l'un entraînent des perfectionnements chez l'autre, et vice versa. Ainsi naît une sorte de spirale, faisant intervenir des performances de plus en plus importantes de part et d'autre. Un prédateur plutôt lourdaud et une proie assez peu mobile se transforment, au bout de millions d'années, en chasseur agile et gibier rapide. En biologie de l'évolution, un tel développement conjoint est appelé "coévolution"* »³⁹⁸.

Ainsi, Josef Helmut Reichholf, écologiste et biologiste de l'évolution, incite à réfléchir sur l'origine de la mobilité, notamment sur notre propre comportement du point de vue de la vitesse et de l'énergie. Il évoque les différentes formes de base de la locomotion, leur genèse et les performances correspondantes en les associant en une série de réflexions et d'interprétations concernant la corrélation entre la locomotion et l'évolution. Il cherche à penser l'évolution non plus avec le concept darwinien d'« *adaptation optimale au milieu ambiant* », mais avec l'idée inverse d'une émancipation par rapport à cet impératif. Ce qui implique la valorisation du "déséquilibre" (manque ou excédant) comme facteur qui aurait influencé la vie des organismes bien plus profondément que les informations génétiques. Le succès d'une espèce animale peut être mesuré par l'héritage génétique que laisse cet animal, c'est-à-dire sa capacité de survivre en se reproduisant, mais « *alors que le patrimoine génétique peut exister en tant que pure information, il n'a pas besoin du métabolisme, l'organisme ne le peut pas, il a besoin du déséquilibre créé par le métabolisme* »³⁹⁹ Josef Reichholf se positionne entre l'héritage de deux physiciens : celui d'Erwin Schrödinger, qui a démontré que la vie ne pouvait se trouver dans l'état d'équilibre thermodynamique⁴⁰⁰ et celui d'Ilya Prigogine qui, en outre, a

³⁹⁸ Reichholf J. H. *Mouvement animal et évolution : courir, voler, nager, sauter*. Traduit de l'Allemand par Paul Kessler. Paris : Flammarion, 1994, p. 21.

³⁹⁹ Reichholf J. H. *L'émancipation de la vie*. Traduit de l'allemand par Jeanne Etoré-Lortholary. Paris : Flammarion, 1993 [1996], p. 18.

⁴⁰⁰ Schrödinger E. *What is life? The physical aspect of the living cell*. Cambridge : At the University press, [1944] 1947.

expliqué que le processus du vivant consiste à créer plus rapidement du désordre que le taux naturel de production de désordre et d'énergie thermique irradiés dans l'univers ne le voudrait.⁴⁰¹ Pour Josef Reichholf la locomotion est devenue, presque depuis les origines, une sorte de force motrice de l'évolution, où : « *Ce que nous vivons de façon immédiate, avec notre penchant pour la vitesse, est en fait la conséquence de processus d'évolution qui se déroulent depuis des centaines de millions d'années. La locomotion est l'un des grands principes universels de réussite de l'évolution* »⁴⁰². La locomotion dans son amélioration constante a ouvert des espaces toujours plus vastes et des possibilités d'existence toujours plus nombreuses. Elle a conduit les êtres vivants vers plus d'individualités les libérant des contraintes environnementales, devenant un principe de réussite de l'évolution. Chez l'homme, la marche en position verticale lui a permis d'explorer des quantités d'informations et de tester de nouvelles hypothèses perpétuant le fondement du développement de la pensée et de l'esprit par l'accélération du développement du cerveau. Une étude pertinente, du point de vue de la biologie de l'évolution de la locomotion, suppose que l'on ne considère pas seulement la situation actuelle, mais également les longues périodes d'évolutions qui ont contribué à ces états, pour envisager d'autres perspectives, d'autres théories⁴⁰³.

4) D'une conception mécanique du corps à son fonctionnement biomécanique

On appelle la mécanique animale l'ensemble des lois qui président aux phénomènes organiques. Mais ce nom est plus spécialement consacré pour désigner cette partie de la physiologie qui s'occupe des mouvements qu'exécutent certains organes, et à laquelle on peut faire l'application des lois de la statique et de la dynamique. Cette expression embrasse toutes les questions qui se rattachent à l'étude des phénomènes de mouvements dans l'ordre biologique. Tous les organismes vivants manifestent leur qualité de vie par, ce caractère commun et exclusif d'accomplir des mouvements soit d'ensemble ; soit partiels, dont ils trouvent le point de départ en eux-mêmes. Cette dernière circonstance les distingue des corps inorganiques, incapables de changer, par leur propre spontanéité, leur état de repos ou de déplacement actuel. D'autre part, en tant que corps ou objets matériels, les êtres vivants sont soumis à toutes les lois de la mécanique inorganique.

⁴⁰¹ Chevalier L. *La frontière entre guerre et paix*. Paris : L'Harmattan, 2004, p. 18.

⁴⁰² Reichholf J. H. *Mouvement animal et évolution : courir, voler, nager, sauter*. Traduit de l'Allemand par Paul Kessler. Paris, Flammarion, 1994, p. 11.

⁴⁰³ Gould S. J. *La structure de la théorie de l'évolution*. [Traduction de Marcel Blanc. *The structure of evolutionary theory*, 2002]. Paris : Gallimard, 2006.

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

Certains conflits ou, plus exactement, certaines résultantes sont donc produites par la rencontre en elles des forces de la physique proprement dite, et de celles que manifestent les conditions propres à la biologie. C'est l'étude de ces résultantes qui constitue la mécanique animale.

Les problèmes qui se rattachent à la mécanique animale ont, de tout temps, et au plus haut degré, attiré l'attention des biologistes et même des médecins praticiens. Dans la lecture de la plupart des classiques, tout phénomène qui s'offre à l'observation y trouve quelques explications plus ou moins exactement fondées sur les lois de la mécanique. N'a-t-on pas eu toute une école d'iatromécaniciens au XVII^e siècle ? Aujourd'hui encore, l'analogie peut servir d'exemple simplificateur de compréhension et d'apprentissage de la biologie ou plus précisément de la biolocomotion⁴⁰⁴.

Les fonctions locomotrices restent d'une très grande complexité, par leurs variées et adaptations multiples à des modes de vie distincts, liées à des milieux aussi différents que la terre, l'air et l'eau. Les systèmes et les processus de régulations mis en jeu sont à multiples variables et degrés de liberté pour déclencher les mouvements entraînant les déplacements. Les postures et les déplacements fonctionnent comme des systèmes mécaniques complexes, aux régulations instables.

Avec leurs structures anatomiques originales, les animaux ont la possibilité de se déplacer avec la même efficacité, selon des moyens différents. La grande diversité des modes de locomotion correspond à la perpétuelle conquête de l'évolution, comme celle, à moindre échelle de l'esprit humain pour la comprendre. La connaissance du corps humain a représenté une quête permanente pour valider certains principes et lois mécaniques ou biologiques. Le profil historique de l'étude du mouvement s'est déterminé sur plusieurs disciplines scientifiques entre autres, l'anatomie, la physique, la médecine et la biologie ; l'évolution des connaissances dans certains champs disciplinaires profitant à d'autres. La biomécanique à la croisée des autres modèles de pensées et de méthodes a émergé progressivement et par bonds successifs vers la fin du XIX^e siècle. Après une longue période de plus de deux mille ans où la description qualitative anatomo-mécanique humaine et animale était prépondérante, l'évolution rapide des sciences a conduit le XVII^e siècle à accentuer l'analyse quantitative. Les développements

⁴⁰⁴ Cappozzo A., Marcheni M., Tosi V. Biolocomotion: Century of research using moving pictures. [Livre qui a fait suite au symposium sur ce même titre réalisé à Formia en Italie du 14 au 17 Avril 1989, sous le patronage de la Société internationale de Biomécanique (ISB).] Rome, Promograph, 1992.

technologiques connaîtront un rayonnement qui changera les conceptions de la mesure et de l'instrumentation. Le statut de la biomécanique sera renforcé comme champ disciplinaire majeur de l'étude du mouvement.

1. L'énergie mécanique dans la locomotion⁴⁰⁵

Les possibilités animales et humaines, dans l'accomplissement d'une locomotion de survie, c'est-à-dire de performance bien souvent pour les animaux chassés, ne peuvent être définies et mesurées qu'en fonction des lois physiologiques et mécaniques qui les régissent. Les performances locomotrices sont avant tout considérées par une très grande majorité de biologistes, comme l'aboutissement de processus énergétiques d'essence biochimique. Depuis cette approche, les muscles sont assimilés à des moteurs, des convertisseurs d'énergie chimique en énergie mécanique. De ce fait, les aptitudes et les performances sont considérées comme l'expression de potentiels bioénergétiques. Cependant, si la majorité des études se centre sur l'importance des mécanismes biochimiques dans le déterminisme de la performance, il convient de constater que les adeptes de cette conception évitent dans leurs raisonnements les facteurs mécaniques. Ce qui devient délicat pour étudier certaines propriétés entre autres, qu'ont les muscles à absorber et restituer de l'énergie mécanique dans de nombreux mouvements comme les sauts, les courses... Finalement, l'étude de la locomotion au travers du problème du calcul des possibilités du corps animal se résume essentiellement à un problème de mesures scientifiques. Aujourd'hui, avec le progrès des instruments d'analyses biomécaniques, c'est une difficulté certainement ardue, mais non insoluble et peut l'être, car plus facilement abordée de nos jours que par le passé.

2. Le coût énergétique

L'analyse des mouvements a connu au cours du XIX^e siècle des développements intéressants par la mise au point de techniques d'enregistrements nouvelles, ainsi que par la simplification de méthodes relativement complexes, quant à leur application. Les instruments de mesure ont permis d'analyser les dépenses et les coûts des locomotions animales plus rigoureusement. En effet, l'être vivant est le siège de réactions chimiques libératrices d'énergie depuis les aliments chargés d'énergie et de l'oxygène. Tout effort musculaire entraîne une élévation du métabolisme énergétique qui dépend de son

⁴⁰⁵ Bouisset S. *Biomécanique et physiologie du mouvement*. Paris, Editions Masson, 2002.

intensité. Il peut multiplier jusqu'à vingt fois l'énergie dépensée de repos chez l'homme. Plus celui-ci est grand, plus le nombre et le degré de sollicitations des fibres musculaires engagées dans l'effort s'élèvent et plus les besoins en énergie s'accroissent. Chez l'homme ou le quadrupède lors de la marche, la dépense d'énergie (\dot{E}), mesurée par la consommation d'oxygène par unité de temps ($\text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), augmente de manière curvilinéaire avec la vitesse de progression. La pente de la relation augmente avec l'inclinaison du sol en montée et diminue avec celle-ci en descente. L'allure du phénomène est un peu différente dans la course où la dépense énergétique est une fonction linéaire de la vitesse. Dans cette relation la dépense énergétique par unité de temps a les dimensions d'une puissance. Ainsi, en divisant (\dot{E}) par la vitesse (v), on obtient le coût énergétique (CE) par unité de distance parcourue. Le coût énergétique représente une quantité d'énergie consommée par unité de distance où comme dans l'équation ci-dessous, l'énergie consommée par unité de temps (\dot{E}) divisée par la vitesse de déplacement (v).

$$CE = \frac{\dot{E}}{v} \quad \text{Équation 5}$$

\dot{E} correspond à la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) exprimé en $\text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ lorsque les conditions d'exercice sont stables et strictement aérobies et CE s'exprime en $\text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. L'appréciation et l'amélioration des performances des différentes locomotions animales ou humaines correspondent à une augmentation de la puissance métabolique de type aérobie ou anaérobie des êtres vivants concernés et/ou d'une diminution de CE.

3. Le calcul du travail et de l'énergie mécanique

Le travail mécanique accompli par les muscles pendant la locomotion d'un animal peut être divisé en deux composantes, le travail externe (W_{ext}) et le travail interne (W_{int}) ; le travail mécanique total (W_{tot}) constituant leur somme.

$$W_{tot} = W_{ext} + W_{int} \quad \text{Équation 6}$$

Le travail externe, se définit comme le travail accompli par des muscles contre la résultante des forces et des moments extérieurs exercés sur le corps, en l'occurrence par la gravité, le sol, et éventuellement l'air. En d'autres termes, W_{ext} représente le travail qui permet de déplacer le corps, son centre de gravité (CG) par rapport à un système d'axes fixes lié à l'environnement matériel.

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

Le travail interne, W_{int} , constitue la somme des travaux effectués par les forces et les moments internes au corps. Le travail interne n'implique en lui-même aucun déplacement du centre de gravité, même s'il est utile pour configurer le corps de façon à produire le travail externe dans les meilleures conditions, par exemple ramener le membre d'appui vers l'avant à chaque pas. En d'autres termes, W_{int} indique le travail réalisé par les muscles, d'une part, pour déplacer les membres les uns par rapport aux autres et, d'autre part, pour vaincre la viscosité des ligaments et des muscles, ainsi que les frictions au niveau des articulations. Le travail effectué globalement par les muscles est évalué à partir du décours temporel de l'énergie externe et interne pendant la période considérée. Toutefois, il s'avère délicat d'attribuer l'augmentation d'énergie, d'un segment ou d'un membre, à un travail musculaire ou à un simple transfert d'énergie.

Le travail externe W_{ext} , comme le travail interne, peut-être « moteur » (ou « positif », ou encore « actif »), lorsqu'il entraîne une augmentation des quantités d'accélération (ou de leur moment), se traduisant notamment par une élévation du centre de gravité. Il est dit « résistant » (ou « négatif », ou « passif ») dans le cas contraire. La locomotion procède d'un travail « mixte », associant travail positif et négatif. Néanmoins, le calcul du rendement du travail positif (R_m^+) constitue le seul moyen d'estimer l'énergie élastique par exemple. À cet effet, il est nécessaire de connaître, outre le travail positif total (W^+), la consommation d'oxygène (ΔV_{O_2}), qui mesure l'énergie métabolique dépensée par l'organisme au cours de l'exercice. Les études spécialisées admettent qu'un rendement supérieur à 25 % indique que de l'énergie élastique se stocke dans les muscles et les tendons, puis se restitue.

L'énergie mécanique se présente dans le corps sous la forme d'énergie potentielle (E_p) et d'énergie cinétique (E_c). L'énergie potentielle, constitue l'énergie emmagasinée. Elle est due aux forces dites conservatives, qu'il s'agisse de forces invariables, comme la pesanteur, ou ne dépendant que de la position du mobile, comme les forces élastiques. Dans le cas où ces dernières n'agissent pas, on aura :

$$E_p = m g h \qquad \qquad \qquad \text{Équation 7}$$

où E_p est l'énergie potentielle (en joules), m la masse (en kg), g l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), et h la hauteur du centre de masse (en m). L'énergie potentielle augmente donc avec la hauteur du corps par rapport au sol, ou à toute autre référence convenable.

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

L'énergie cinétique correspond à l'énergie d'un corps en mouvement. Dans un mouvement de translation, on appelle « énergie cinétique » (ou force vive) de translation » (en joules), $E_{c,t}$:

$$E_{c,t} = \frac{1}{2} m V_G^2 \quad \text{Équation 8}$$

où V_G (en m/s) est la vitesse linéaire du centre de masse G (ou de tout autre point).

Dans un mouvement de rotation autour d'un axe fixe, l'énergie cinétique de rotation (en joules), $E_{c,r}$, s'exprime ainsi :

$$E_{c,r} = \frac{1}{2} m_{G\Delta} \dot{\theta}^2 \quad \text{Équation 9}$$

$\dot{\theta}$ étant la vitesse angulaire (en rad/s) et $J_{G\Delta}$, le moment d'inertie par rapport à l'axe fixe Δ passant par G .

Dans le cas général, l'énergie cinétique, E_c (en joules), d'un solide rigide est donnée par la relation :

$$E_c = E_{c,t} + E_{c,r} = \frac{1}{2} m V_G^2 + \frac{1}{2} m_{G\Delta} \dot{\theta}^2 \quad \text{Équation 10}$$

L'énergie mécanique totale, E_{tot} , est la somme des trois formes d'énergie précédentes :

$$E_{tot} = m g h + \frac{1}{2} m V_G^2 + \frac{1}{2} m_{G\Delta} \dot{\theta}^2 \quad \text{Équation 11}$$

C'est l'énergie mécanique d'un solide invariable, qui peut s'échanger à l'intérieur d'un chaînon. On constate la nécessité de localiser le centre de gravité et tout l'intérêt d'une méthode simple pour apprécier sa position, comme celle envisagée par Borelli.

4. Application du théorème de l'énergie cinétique

La loi de la conservation de l'énergie exprime qu'un corps conserve une énergie mécanique totale constante, tout en échangeant les différentes formes d'énergie entre elles : « la somme de l'énergie potentielle et des énergies cinétiques de translation et de rotation est constante ». La loi s'applique à la condition expresse qu'il n'y ait pas de frottement, c'est-à-dire que le système soit « conservatif ». Sinon, il y a apparition de chaleur et l'énergie mécanique est moindre : le système est « dissipatif ».

Le « théorème de l'énergie cinétique », ou « théorème des forces vives », appliqué à un système articulé de solides rigides, s'écrit :

$$\Delta E_c = W_{F_{ext}} + W_{F_{int}} \quad \text{Équation 12}$$

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

Il s'énonce de la façon suivante : « la variation de l'énergie cinétique ΔE_c , d'un système articulé en mouvement, entre deux instants quelconques, est égale à la somme des travaux de toutes les forces du système, tant extérieures $W_{F_{ext}}$ qu'intérieures $W_{F_{int}}$, pendant le même temps ». Le fait que le travail des actions intérieures puisse ne pas être nul, contrairement à leur somme, se comprend aisément. En effet, ces actions sont appliquées en des points différents du corps, et donc il n'y a aucune nécessité pour que le travail qu'elles produisent s'annihile. Dans le contexte énergétique où l'on se place, il est nécessaire de tenir compte des forces intérieures, c'est-à-dire principalement des forces musculaires. Le théorème de l'énergie cinétique permet de procéder de façon globale, contrairement aux théorèmes de la quantité de mouvement. En revanche, seuls ces derniers permettent d'individualiser les forces intérieures.

L'énergie cinétique totale, E_c , du corps humain, système de solides articulés particulier, est celle de son centre de gravité, G , à laquelle s'ajoute celle résultante du mouvement des différentes parties du corps par rapport à des axes de direction fixe passants par G :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_G^2 + \sum \frac{1}{2} m_i V_i^2 + \sum \frac{1}{2} J_{G_i \Delta} \dot{\theta}_i^2 \quad \text{Équation 13}$$

Le premier terme correspond à l'énergie cinétique du centre de gravité, résultant du travail des forces extérieures. Les deux suivants représentent l'énergie cinétique interne du corps humain. Il s'agit de la somme, \sum , des énergies cinétiques associées aux mouvements des segments corporels (masses : m_i ; moments d'inertie : $J_{G_i \Delta}$), à savoir celui de leur centre de gravité, G_i et celui de chacun d'eux par rapport à ce dernier. En conséquence, elle comporte deux composantes, l'énergie cinétique linéaire (vitesses : v_i) et l'énergie cinétique angulaire (vitesses : $\dot{\theta}_i$). C'est le mode de calcul auquel on se réfère pour déterminer l'énergie totale du corps dans la locomotion. En conséquence, considérer uniquement le corps humain comme un point pesant revient à se limiter au premier terme de cette relation. On comprend les risques d'erreurs attachés à une telle démarche.

5. Évaluation de l'énergie mécanique et de l'énergie métabolique.

Le travail musculaire, c'est-à-dire le résultat de la contraction des muscles lors du maintien d'une posture ou de l'exécution d'un mouvement, procède de réactions biochimiques mettant en jeu les sources d'énergie du muscle. Il en résulte une dépense d'énergie métabolique et la production d'un travail mécanique. Toute l'énergie

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

métabolique ne se retrouve pas sous forme d'énergie mécanique, du fait du rendement du muscle. Le rendement (R_m) s'écrit :

$$R_m = \frac{W}{E_{Met}} = k \frac{W}{\Delta V_{O_2}} \times 100 \quad \text{Équation 14}$$

Si R_m (en %) est le rendement musculaire, W , le travail total (en kJ) et E_{Met} (en kJ), l'énergie métabolique dépensée au cours du mouvement, mesurée par la consommation d'oxygène nette, ΔV_{O_2} (en ml), et k , un coefficient d'équivalence entre le travail mécanique et le volume d'oxygène consommé ($k \approx 50$).

Chez l'homme, les meilleurs rendements musculaires obtenus n'excèdent pas 20 à 25 %. En d'autres termes, lors d'un effort musculaire, 75 à 80 % de l'énergie consommée est dégradée sous forme de chaleur, en raison de l'énergie utilisée dans les périodes de travail « statique », et pour vaincre les frottements d'origine articulaire et musculo-tendineuse, voire la résistance à l'avancement. Néanmoins, si de l'énergie élastique a été stockée dans les muscles, comme au cours de la locomotion, le rendement pourra être supérieur.

Comme on peut le percevoir, étant donné les variables intervenant dans l'équation, l'étude biomécanique nécessitera le recueil des données cinématiques, cinétiques, et éventuellement électromyographiques, avec les problèmes récurrents que soulèvera leur mesure.

Le travail total (W) est évalué par la variation de l'énergie mécanique totale (E_{tot}). Celle-ci est égale à la somme de l'énergie externe (E_{ext}) et de l'énergie interne (E_{int}) du système :

$$E_{tot} = E_{ext} + E_{int} \quad \text{Équation 15}$$

Dans la locomotion terrestre à vitesse spontanée, sur un sol plat et ferme, les forces dissipatrices sont négligeables, car le pied ne glisse pas sur le sol et les forces de résistance à l'avancement dues au frottement de l'air sont faibles.

L'énergie totale du système à chaque instant est donnée par la relation de l'équation, dont la formulation est explicitée en détail par Willems et coll. (1995)⁴⁰⁶. On peut constater que l'expression de l'énergie cinétique est celle de la relation :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_G^2 + \sum \frac{1}{2} m_i V_i^2 + \sum \frac{1}{2} J_{G_i \Delta} \dot{\theta}_i^2 \quad \text{Équation 16}$$

⁴⁰⁶ Willems P., Cavagna G., Heglund N. External, internal and total work in human locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 1995, 198 : p. 379-93.

D'où

$$E_{tot} = mgh + \frac{1}{2}mV_G^2 + \sum \left(\frac{1}{2}m_i v_i^2 + \frac{1}{2}m_i R_i^2 \dot{\theta}_i^2 \right) \quad \text{Équation 17}$$

Dans cette équation, h est la hauteur du centre de masse, G (m est la masse corporelle), dans le repère fixe d'origine O , et g l'accélération de la pesanteur ; V_G , est la vitesse de G par rapport à ce référentiel fixe ; v_i et $\dot{\theta}_i$, représentent la vitesse linéaire du centre de masse et la vitesse angulaire du i^e segment, par rapport au repère d'origine G , et dont les axes sont parallèles à ceux du repère fixe ; R_i ; est le rayon de giration du i^e segment par rapport à son centre de masse.

Les deux premiers termes de l'équation représentent l'énergie mécanique externe, E_{ext} , qu'il est préférable de mesurer avec une plate-forme de forces. L'évolution temporelle de l'énergie externe permet de mettre en évidence chez l'homme la différence majeure entre la marche et la course. En effet, au cours d'un cycle de marche, l'énergie cinétique du centre de gravité, selon la direction de la progression, est en opposition de phase avec la somme de son énergie cinétique et potentielle selon l'axe vertical, comme on l'observe pour un pendule. Il en résulte que les variations d'énergie au niveau du centre de gravité corporel sont réduites, du fait de la transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle, et inversement.

Ce processus, qui permet de conserver 60-70 % de l'énergie totale pour des vitesses modérées, tend vers zéro lorsque la vitesse de la marche devient très lente ou très rapide. En revanche, dans la course, ces deux composantes de l'énergie du centre de gravité sont en phase, ce qui suggère un mécanisme de rebond. Il en résulte que le processus de transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle conserve à peine 5 % du travail mécanique requis pour élever et accélérer le centre de gravité. Mais une quantité substantielle d'énergie mécanique est conservée grâce au processus de stockage - restitution d'énergie élastique par les muscles et les tendons, le rendement étant supérieur à 25 %. La mise en œuvre de ce même processus n'est pas absente dans la marche.

Le troisième terme de l'équation E_{tot} représente l'énergie mécanique interne, E_{int} . Celle-ci est calculée à partir des variations de l'énergie cinétique de chacun des segments de membre lors de leurs mouvements par rapport au repère ayant pour origine le centre de gravité corporel. Néanmoins, si l'on s'intéresse à l'évaluation du travail musculaire, il est préférable de considérer plus globalement l'énergie cinétique de chaque membre,

ce qui permet de minimiser l'effet des transferts inter segmentaires d'énergie. On peut constater que la contribution des membres supérieurs, bien que faible, n'est pas négligeable par rapport à celle des membres inférieurs, tant pour la marche que pour la course.

Par ailleurs, à chaque instant, l'énergie mécanique totale (E_{tot}) du système corporel est la somme de son énergie potentielle élastique (E_{el}), de son énergie potentielle gravifique (E_p) et de son énergie cinétique (E_c). Soit :

$$E_{tot} = E_{el} + E_p + E_c \quad \text{Équation 18}$$

Si E_p et E_e sont mesurables, il n'existe aucune technique permettant de mesurer directement l'énergie potentielle élastique, notamment celle résultant du stockage par un muscle de l'énergie produite par un autre muscle, lors de co-contractions entre muscles agonistes et antagonistes. C'est pourquoi on a recours à l'évaluation du rendement énergétique.

Le travail musculaire ainsi évalué varie selon les conditions de la marche. Il est significativement inférieur dans la marche comparativement à la course. Il est accru lors du transport de charges. De même, la marche sur du sable requiert une dépense d'énergie métabolique 2,1 à 2,7 fois plus élevées pour une même vitesse.

La locomotion implique une maîtrise des énergies mises en jeu : énergie métabolique qui reflète la dépense énergétique durant une action et l'énergie mécanique qui permet de mettre le corps en mouvement. De nombreuses études portant sur la marche et la course ont été menées en deux dimensions, dans le plan sagittal. Cependant, ces études ne rendent pas compte des mouvements de rotation et notamment ceux autour de l'axe vertical comme par exemple, la rotation du buste. Les études du mouvement en trois dimensions sont donc nécessaires pour pouvoir juger de l'énergie mécanique réellement mise en jeu (Winter, 1995)⁴⁰⁷. De plus, peu d'études ont cherché à rapprocher l'énergie métabolique de la puissance mécanique (Myers, 1993),⁴⁰⁸ mais ceci s'avère indispensable afin de juger l'efficacité d'une motricité quelconque.

La biomécanique offre des cadres conceptuels, où l'application des lois de la mécanique aux êtres vivants est possible, mais avec des limites de précisions. Dans ce

⁴⁰⁷ Winter D.A. Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model? *Journal of Biomechanics*, 1995, 28 (6), p. 753-758.

⁴⁰⁸ Myers M. J., Steudel K., White S. C. Uncoupling the correlates of locomotor costs: a factorial approach. *Journal of Experimental Zoology*, 1992, 265, p. 211-223.

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

cadre, l'analyse biomécanique présente plusieurs avantages. Elle facilite la description objective et précise des postures et mouvements, mais aussi leur quantification. Il s'avère possible également de déterminer les forces mises en jeu, globalement, au niveau du corps dans son ensemble, ou au niveau de telle ou telle articulation. L'énergie produite et dégagée au cours du mouvement se calcule par l'intermédiaire d'instruments de mesures adaptés. La complexité du corps de l'homme et des animaux implique l'élaboration préalable de formes plus schématiques, ainsi l'analyse des actes moteurs reste accessible. Les connaissances anatomiques sur l'appareil d'exécution périphérique du mouvement doivent être alors transposées en termes biomécaniques.

Plusieurs sciences comme la mécanique, l'anatomie fonctionnelle, la physiologie, la biomécanique et les sciences cognitives s'intéressent principalement ou occasionnellement à la locomotion, mais pour aucune d'entre elles, sauf la biomécanique, l'étude du mouvement ne représente un aspect central. Les mouvements globaux ou parcellaires du corps humain ou animal mis en jeu par la contraction de certains muscles ou chaînes musculaires sous l'influence du système nerveux central aboutissent en dernière analyse à un déplacement des leviers osseux du squelette susceptible d'exercer une force dans le monde extérieur. Il devient possible de recourir aux lois fondamentales de la mécanique pour analyser les aspects extérieurs du mouvement humain dans la mesure où le corps de l'homme se trouve soumis aux mêmes lois mécaniques que tout objet animé ou non. Malgré les difficultés techniques et les nécessaires simplifications qui rendent relativement imprécises les études du mouvement ces dernières décennies la biomécanique a progressé de façon sensible. En dépit de sa relative imprécision et de sa complexité, cette manière d'aborder les problèmes posés par les attitudes et les mouvements de l'homme et des animaux a permis de mieux connaître a posteriori leurs caractéristiques d'efficacité et d'économie.

Cependant pour se rapprocher davantage de la réalité, il s'agit maintenant d'étudier le mouvement en croisant les points de vue, en agencant les principes et les concepts de la mécanique avec ceux de la physiologie et des sciences cognitives. Car les principes qui sous-tendent l'étude du mouvement sont ceux-là mêmes qui trament chacune des sciences constituantes : les principes et les lois de la mécanique, le principe de l'unité des êtres vivants, celui de la hiérarchisation du système nerveux, etc. Irrémédiablement, cela provoque une vision parcellaire des phénomènes révélant les limites d'une connaissance globale de l'animal en mouvement. Mais l'approche

Partie III. Chapitre 3. Coût énergétique et rendement mécanique

pluridisciplinaire des phénomènes complexes comme le mouvement génère par exemple, l'élaboration de nouvelles théories sur l'évolution.⁴⁰⁹

⁴⁰⁹ Kerlirzin Y., Dietrich G., Megrot F. EPS interroge Simon Bouisset biomécanicien du mouvement. *Revue EPS*, 2005, n°316, p. 5-10.

Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

La locomotion représente l'activité la plus courante des animaux supérieurs, dont l'homme. Avec le temps, elle est devenue un mouvement usuel utilisé quotidiennement se définissant simplement comme une action motrice qui assure le déplacement du corps dans l'environnement. Il faut convenir que les animaux inférieurs n'ont pas de locomotion, leur activité étant limitée à un espace proche du corps. La faculté de déplacement représente une grande modification de l'évolution de la création en élargissant notamment les perspectives de nos ancêtres, permettant la mise en place de nouvelles stratégies de subsistances pour trouver de la nourriture ou fuir le danger.

La locomotion a permis chez les animaux l'émergence de nouvelles stratégies motrices en améliorant considérablement leur vie courante. Chez les hommes, la locomotion par la bipédie a contribué à l'apparition puis le développement de nouveaux systèmes de contrôles nerveux englobant l'ensemble du système nerveux central des animaux supérieurs contemporains (Latash, 2002)⁴¹⁰. Sans locomotion, l'homme serait resté très dépendant d'un milieu restreint, d'une nourriture difficile à atteindre et aurait constitué une proie facile pour ses prédateurs, sans doute lui doit-il sa survie.

La bipédie est l'évolution fondamentale d'une adaptation qui place les hominidés et donc les hommes dans une position spécifique par rapport aux primates. Un enfant en bas âge qui trotte, adapte ses premiers pas hésitant en utilisant essentiellement le même modèle de marche qu'un adulte d'une taille très supérieure⁴¹¹. Cependant, il n'y a pas seulement les humains qui utilisent la bipédie comme mode primaire de locomotion terrestre, les dinosaures, dont certains avaient une taille de plus de 5 m, utilisaient une démarche de course similaire⁴¹², mais aussi la plupart des oiseaux qui se déplacent sur terre par petits bonds⁴¹³. Ceci mène à la question évidente : comment peut-on comparer ces modèles de démarches pour tous ces différents animaux ? Une réponse possible se situe dans le domaine de la similitude physique et de

⁴¹⁰ Latash M. L. *Bases neurophysiologiques du mouvement*. Traduction de la première édition américaine *Neurophysiological Basis of Movement* (1998) par Paul Delamarche et Arlette Delamarche. Paris : DeBoeck Université, 2002.

⁴¹¹ Vaughan C. Theories of bipedal gait : an odyssey. *Journal of Biomechanics*, 2003, 36, p. 513-23.

⁴¹² Alexander R. M. How dinosaurs ran. *Scientific American*, 1991, 264(4), p. 62-8.

⁴¹³ Hayes G., Alexander R. M. The hopping gaits of crows (Corvidae) and other bipeds. *Journal of Zoology*, 1983, 200, p. 205-13.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

l'analyse dimensionnelle⁴¹⁴. Il y a plus de 130 ans, l'architecte naval William Froude présentait un paramètre sans dimension qui servit de critère de similitude dynamique pour comparer les coques de bateaux de différentes longueurs⁴¹⁵. Ce paramètre, aujourd'hui connu sous le nom de nombre de Froude ou Fr, est égal à :

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \quad \text{Équation 19}$$

où v représente la vitesse (m.s^{-1}), g l'accélération de la gravité (m.s^{-2}), et L une longueur caractéristique pour la technologie nautique, la longueur de coque.

1) Le nombre de William et Robert Froude.

L'approche de la science par William Froude⁴¹⁶, se résume dans une expression qu'il citait souvent : « *Notre devoir sacré [est] de douter de chaque proposition émise par nous et compris nous-même* »⁴¹⁷. En expérimentant sur différents modèles de maquettes, il a démontré qu'il n'y avait aucune forme idéale et que la performance variait principalement avec la vitesse. Ses travaux l'ont conduit avec l'assistance de son fils et l'aide financière de l'état, à construire un chenal expérimental de 100 m de long. Ils pouvaient ainsi tracter ses maquettes à une vitesse connue sur de l'eau immobile, en utilisant l'aide d'un treuil actionné par la puissance de la vapeur qui tirait un chariot, le long d'une voie suspendue au-dessus du réservoir. La force de la résistance à l'avancement, agissant sur les modèles réduits, était contrôlée par un dynamomètre élaboré sur mesure⁴¹⁸. Ainsi il observa que les grands et les petits modèles de coques géométriquement semblables, produisaient différents modèles de vague, une fois remorqués à la même vitesse.

Cependant, si la coque plus grande était tirée à de plus grandes vitesses, il y avait une vitesse à laquelle les modèles de vague étaient presque identiques. Cela se produisait quand le rapport de la vitesse au carré à la longueur de coque était le même pour de grandes et petites coques. Il a ainsi démontré que les coques géométriquement identiques, seraient dynamiquement semblables, en termes de résistance à l'avancement, lorsque ce ratio, maintenant connu comme nombre de Froude serait constant. Selon ses propres mots : « *Law of Comparison* » is that if the speeds of the ships are proportional to the square roots of their dimensions, their

⁴¹⁴ Duncan W. J. *Physical similarity and dimensional analysis*. London : Edward Arnold, 1953.

⁴¹⁵ Froude W. On useful displacement as limited by weight of structure and of propulsive power. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1874, 15, p. 148-55.

⁴¹⁶ Froude W. The theory of "stream lines" in relation to the resistance of ships. *Nature*, 1875, 13, p. 50-2.

⁴¹⁷ Brown D. In Froude W, Newman JH, editors. A sacred duty to doubt, paper presented to the Royal Institution of Naval Architects, London : 21 September 1998.

⁴¹⁸ Froude W. On the comparative resistances of long ships of several types. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1876, 17, p. 181-8.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

resistances at those speeds will be as the cubes of their dimensions. »⁴¹⁹. William Froude a édité de nombreuses publications savantes dans des journaux à forts impacts scientifiques, et son fils, Edmund a poursuivi les recherches sur l'hydrodynamique, notamment sur les propriétés de propulsion par hélice. Ils ont laissé un indélébile legs à l'histoire de la navigation, mais aussi pour la compréhension de la locomotion animale, car le rapport a été utilisé pour comparer de nombreux modes de déplacements.

2) D'Arcy Wentworth Thompson : hypothèse dynamique de similitudes

Tandis que les Froude centraient leurs recherches sur le déplacement des bateaux, D'Arcy Wentworth Thompson effectuait le rapprochement entre le nombre de Froude et la locomotion animale. Thompson possédait un ensemble étonnant de qualifications, à la fois érudit en grec, biologiste et mathématicien. Bien qu'auteur prolifique de presque trois cents articles et une série de livres scientifiques⁴²⁰, il sera principalement connu pour son livre *On Growth and Form*, édité pour la première fois en 1917⁴²¹. Cette œuvre occupe une place particulière dans l'étude des sciences de la vie. Les analyses des phénomènes biologiques sont envisagées depuis l'application de lois mathématiques notamment la géométrie des formes et leurs spécificités physiques principalement le jeu des forces.

Comme le note Stephen Jay Gould dans la préface de la version française, « [...] cet imposant traité reste avant tout l'exposé d'une théorie biologique [...] Selon cette théorie, sorte d'hybride des travaux de Newton et de Pythagore, la forme des organismes est directement imposée par l'action des forces physiques (par opposition aux forces « internes » et génétiques qui sont responsables, selon une programmation spatio-temporelle bien définie, de la production du matériau brut, ce dernier seul étant soumis à l'effet des lois physiques), et si l'on retrouve partout l'empreinte des géométries idéales chères à l'école classique d'Athènes, c'est bien parce qu'une loi naturelle préside dans une ultime simplicité, à l'expression optimale de l'action de ces forces »⁴²² Déjà dans sa première thèse il indiquait que toutes les locomotions des créatures vivantes pouvaient s'exprimer correctement en termes mathématiques purs. La compréhension

⁴¹⁹ « La loi de comparaison » signifie que si les vitesses des bateaux sont proportionnelles aux racines carrées de leurs dimensions, leurs résistances à ces vitesses seront comme les cubes de leurs dimensions ». In Froude W. *On useful displacement as limited by weight of structure and of propulsive power. Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1874, 15, p. 148-55.

⁴²⁰ Bushnell G. H. A list of the published writings of D'Arcy Wentworth Thompson. In : Clark WELG, Medawar PB. *Essays on growth and form*. Oxford: Clarendon Press, : 1945, p. 386-400.

⁴²¹ Thompson D. W. *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1917.

⁴²² Thompson D. W. *Forme et croissance*. Traduction, adaptation et présentation par Alain Prochiantz de *On Growth and Form*. (1^{re} édition 1917, 793 p. ; 2e édition 1942, 1116 p. Paris : éditions du Seuil, édition du CNRS, 1994, p. 9.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

par Thompson du rapport entre les proportions, le nombre de Froude et la locomotion des animaux se relève dans plusieurs extraits de son magnum opus *On Growth and Form*. Il explicite le concept de la similitude dynamique : « [...] plus un navire ou un poisson seront grands, plus ils se déplaceront vite, et cela dans la limite du rapport de la racine carrée de leur longueur. Car la vitesse (V) du poisson dépend du travail (W) qu'il peut effectuer et de la résistance (R) qu'il doit vaincre. ». Nous avons vu que les dimensions de W et de R sont respectivement l^3 et l^2 ; d'après les lois de la mécanique élémentaire :

$$W \propto RV^2 \text{ ou } V^2 \propto \frac{W}{R} \quad \text{Équation 20}$$

Donc

$$V^2 \propto \frac{l^3}{l^2} = l \text{ et } V \propto \sqrt{l} \quad \text{Équation 21}$$

Cette loi de correspondance des vitesses, appelée loi de Froude, constitue un exemple simple et des plus élégant de l'analyse dimensionnelle.⁴²³

Cet énoncé forme la base d'une discussion sur la force des muscles et la résistance à l'écrasement des os qui changent selon leurs sections transversales. En considérant le mouvement des animaux terrestres, vivant sous l'action directe de la pesanteur, il argue du fait qu'il y a une limite à la taille d'un animal, dont l'éléphant se rapproche. Dans un autre extrait Thompson présente l'analogie entre deux animaux dynamiquement semblables, deux navires à vapeur et leur propulsion : « Deux animaux semblables et apparentés, tout comme deux machines à vapeur de fabrication identique, seront nécessairement soumis à la loi de Froude de comparaisons des navires à vapeur, selon laquelle la puissance varie suivant le carré de leurs dimensions linéaires. »⁴²⁴ Il explore aussi le mouvement des oiseaux et des poissons dans un milieu fluide et prouve qu'en appliquant la loi de Froude, leurs vitesses au carré sont proportionnelles à une dimension linéaire (par exemple la longueur de l'animal). Enfin, il compare les modèles de marche bipède au moyen d'un modèle de pendule comme les frères Weber l'avaient déjà adopté en 1836 : « Comparons à présent deux individus semblables, A et B , qui marchent de manière semblable, c'est-à-dire que l'angle du balancement de leurs jambes est identique (Figure). L'arc du balancement c'est-à-dire l'amplitude de chaque pas varie proportionnellement à leur longueur de la jambe (soit dans un rapport a/b), ou encore à la hauteur ou à toute autre dimension linéaire (l) de l'individu. Mais la durée du balancement varie

⁴²³ opus cit., p. 50.

⁴²⁴ ibid., p. 50.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

comme l'inverse de la racine carrée de la longueur du pendule, soit $\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}}$. La vitesse, que l'on mesure par le rapport de l'amplitude au temps, soit $\frac{a}{b} \times \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}}$, variera donc suivant la racine carrée des dimensions linéaires ; il s'agit à nouveau de la loi de Froude. »⁴²⁵

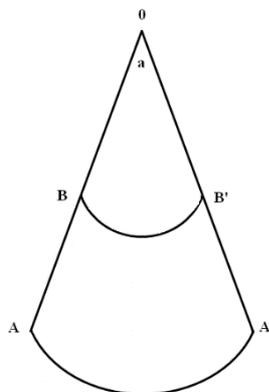


Figure 63. Représentation du balancement des jambes selon deux individus semblables, A et B, qui marchent de manière semblable, avec un angle de balancement identique. L'arc qui correspond à l'amplitude de chaque pas varie proportionnellement à la longueur de la jambe.

Au-delà des différentes allusions au nombre de Froude dans les explications sur le principe de similitude, les relations entre la taille et d'autres grandeurs comme la vitesse, la chaleur corporelle, le saut, la marche, le vol, la gravité, c'est principalement la méthode de raisonnement et son élaboration qui se révèle riche et exemplaire dans ses associations à l'histoire des sciences et sa philosophie dans laquelle : « *Les sciences physiques et la philosophie cheminent côte à côte et se soutiennent mutuellement. Sans la force de la physique, la philosophie serait pauvre, et, sans la richesse de la philosophie, la physique serait faible.* »⁴²⁶

D'Arcy Wentworth Thompson suit l'évolution chronologique des concepts, par exemple dans le chapitre 2 intitulé *De la taille et autres grandeurs*, il aborde le principe de similitude par les mathématiques élémentaires et celles d'Archimède, qui indiquent que : « *l'aire et le volume de figures semblables augmentent respectivement suivant le carré et le cube de leurs dimensions linéaires. Ainsi dans le cas très simple d'une sphère de rayon r, l'aire de la surface est égale à $4\pi r^2$ et le volume à $\frac{4}{3}\pi r^3$; d'où il s'ensuit que le rapport V/S du volume à l'aire est égal à $1/3r$. Cela signifie que V/S varie comme r ; en d'autres termes, le rapport du volume d'une sphère (ou sa masse, si sa densité est uniforme) à son aire sera d'autant plus important que cette sphère est grande. Si L représente une dimension linéaire quelconque, nous exprimerons ces considérations à l'aide des équations générales suivantes : $S \propto L^2$ et $\propto L^3$, ou encore $S = kL^2$ et $V = k'L^3$, où k et k' sont des*

⁴²⁵ *ibid.*, p. 55.

⁴²⁶ *ibid.*, p. 36.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

facteurs de proportionnalité, et $\frac{V}{S} \propto L$ ou $\frac{V}{S} = \frac{k}{k'L} = KL$.⁴²⁷ Il poursuit son développement sur les travaux de Galilée⁴²⁸ qui l'entraîne sur : « La résistance d'un muscle, comme celle d'une corde ou d'une poutrelle métallique, varie en fonction de sa section transversale ; il en est de même pour la résistance d'un os à la compression. »⁴²⁹ ; jusqu'aux travaux sur l'efficacité du travail mécanique musculaire « loi de Borelli » dans un mouvement spécifique comme le saut : « Dans le cas particulier du saut, nous sommes confrontés non pas au problème d'effort continu, mais à celui d'un mouvement soudain, un élan que nous devons mesurer en termes de vitesse initiale. Cette vitesse est proportionnelle à la quantité de mouvement (x), et inversement proportionnelle à la masse déplacée (M) : $V = x/M$. Mais, conformément à une loi qu'on appelle aujourd'hui encore la « loi de Borelli », la quantité de mouvement est proportionnelle au volume du muscle impliqué [Autrement dit, l'énergie développée par un muscle, calculée en kilogramme - mètre par kilogramme de muscle, est identique chez tous les animaux : ce postulat s'accompagne de certaines restrictions lorsque nous en venons à comparer des muscles aussi différents que ceux d'un insecte et ceux d'un mammifère], c'est-à-dire, chez des animaux bâtis de manière semblable – à la masse globale du corps ; en effet, cette quantité de mouvement est proportionnelle à la fois à la section transversale du muscle et à la longueur sur laquelle il se contracte. Par conséquent, la vitesse du saut est la même, quelle que soit la taille de l'animal. Plus simplement encore, le travail (W) effectué au cours d'un saut est proportionnel à la masse de l'animal (m) et à la hauteur atteinte (H), $W \propto mH$. La puissance musculaire développée, quant à elle, est proportionnelle à la masse du muscle, ou encore, chez des animaux bâtis de manière semblable, à la masse globale de l'animal, $W \propto m$. Il s'ensuit donc que H est une constante, ou du moins tend vers une constante. En d'autres termes, et toujours s'ils sont bâtis sur le même modèle, et donc pourvus de bras de levier semblables, tous les animaux devraient sauter non pas à la même hauteur relative, mais à la même hauteur réelle. »⁴³⁰.

3) Robert McNeill Alexander : Théorie d'optimisation mathématique

L'évolution favorise les animaux qui sont les mieux adaptés à leur environnement, selon leur structure ou leur comportement. La théorie d'optimisation représente une branche des mathématiques économiques dont la démarche correspond parfaitement pour modéliser les structures et les comportements biologiques qui s'avèrent dans un certain sens les meilleurs⁴³¹. Elle constitue un outil de réflexion très approprié pour essayer de

⁴²⁷ *ibid.*, p. 43.

⁴²⁸ Discorsi e Dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenenti alla Mecanica ed ai Muovimenti Locali : appresso gli Elzevirri (1638) ; Opere, ed. Favoro, VIII, 169 seq. Trad. Anglaise Henry Crew et A. de Salvio (1914), p.130.

⁴²⁹ *ibid.*, p. 49.

⁴³⁰ *ibid.*, p. 53-54.

⁴³¹ Alexander R. M. Design by numbers. *Nature*, 2001, n°412, p. 591.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

découvrir pourquoi les animaux adoptent des modes de fonctionnement et de déplacement différents, mais qui se correspondent parfaitement.

En dépit de l'impact général du livre de Thompson, l'héritage des Froude et de leur contribution à la compréhension de la proportion et de la propulsion en biologie se minimisa pendant des décennies. La personne qui a réactualisé l'intérêt de l'application du nombre de Froude à la locomotion animale fut Robert McNeill Alexander, professeur de zoologie à l'université de Leeds. Avec la publication de ses livres sur la biomécanique⁴³², ses chapitres de livre qui suscitèrent des conférences spéciales sur la locomotion animale⁴³³, et d'une manière plus importante ses articles dans des journaux à fort impact⁴³⁴. Alexander a garanti que le nombre de Froude pouvait maintenant prendre sa place légitime comme un paramètre important que l'on peut utiliser dans l'étude la démarche bipède.

Le nombre de Froude étant le rapport entre l'énergie cinétique ($\frac{mv^2}{2}$) et l'énergie potentielle gravitationnelle ($mgLc$). Il se définit donc de deux manières en fonction des domaines d'utilisations : $Fr1 = \frac{v}{\sqrt{gLc}}$; $Fr2 = \frac{v^2}{gLc}$ (avec v - vitesse (en m/s) ; g accélération de la pesanteur (9,81 m/s²) ; Lc - longueur caractéristique)

⁴³² Alexander R. M. *Locomotion in animals*. Glasgow: Blackie & Son; 1982. p. 81-113 ; Alexander R. M. *Animal mechanics*. 2nd ed. Oxford: Blackwell; 1983. p. 33-6 ; Alexander R. M. *Elastic mechanisms in animal movement*. Cambridge: Cambridge University Press; 1988. p. 121-5 ; Alexander R. M. *Exploring biomechanics. Animals in motion*. New York: Scientific American Library; 1992. p. 36-40.

⁴³³ Alexander R. M. *Terrestrial locomotion*. In: Alexander R. M., Goldspink G. *Mechanics and energetics of animal locomotion*. London: Chapman and Hall; 1977. p. 168-203 ; Alexander R. M. Mechanics and scaling of terrestrial locomotion. In: Pedley TJ, editor. *Scale effects in animal locomotion*. London: Academic Press; 1977. p. 93-110 ; Alexander R. M. *The mechanics of walking*. In: Elder HY, Trueman ER, editors. *Aspects of animal motion*. Cambridge : Cambridge University Press, 1980, p. 221-35 ; Alexander R. M. *Basic mechanics. Mechanics of animal locomotion*. In: Alexander RM, editor. *Advances in comparative and environmental physiology*, vol. 11. Berlin: Springer-Verlag; 1992. p. 1-15.

⁴³⁴ Alexander RM. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 1976, 261, p. 129-30 ; Alexander RM, Langman VA, Jayes AS. Fast locomotion of some African ungulates. *Journal of Zoology*, 1977, 183, p. 291-300 ; Alexander RM. Estimates of energy cost for quadrupedal running gaits. *Journal of Zoology*, 1980, 190, p.155-92. Alexander RM. Optimum walking techniques for quadrupeds and bipeds. *Journal of Zoology*, 1980, 192, p. 97-117 ; Alexander RM, Jayes AS. A dynamic similarity hypothesis for the gaits of quadrupedal mammals. *Journal of Zoology*, 1983, 201, p.135-52 ; Alexander R. M. Stride length and speed for adults, children, and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 1984, 63, p. 23-7 ; Alexander R. M. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *International Journal of Robotics Research* 1984, 3(2), p. 49-59 ; Alexander R. M. Optimization and gaits in the locomotion of vertebrates. *Physiological Reviews*, 1989, 69(4), 1199-227 ; Alexander R. M. Energy-saving mechanisms in walking and running. *The Journal of Experimental Biology*, 1991, 160, p. 55-69 ; Alexander R. M. Tyrannosaurus on the run. *Nature*, 1996, 379, p. 121 ; Thulborn RA. Estimated speed of a giant bipedal dinosaur. *Nature*, 1981, 292, p. 273-4.

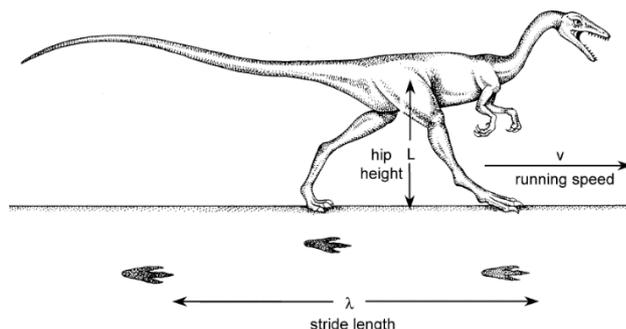


Figure 64. Alexander a montré qu'il était possible d'estimer la vitesse de course v d'un dinosaure, avec la hauteur de la hanche L et une longueur de pas λ (calculé à partir des empreintes de pas respectivement marquées et préservées comme fossiles), en utilisant les données du nombre de Froude d'animaux contemporains Alexander R. M. « Estimates of speeds of dinosaurs ». *Nature*, 1976, 261 : 129-30 ; Alexander R. M. « How dinosaurs ran ». *Scientific American*, 1991, 264 (4) : 62-8.

En 1976, Alexander a effectué une étude pour estimer les vitesses des dinosaures⁴³⁵. Avec des empreintes précisément localisées de dinosaures, il est possible de mesurer l'amplitude des enjambées.⁴³⁶ Alexander a utilisé ses observations sur des animaux vivants, y compris des humains, et les a appliquées à la locomotion des dinosaures. Il a supposé que les mouvements des animaux de forme géométriquement semblable, mais de différentes tailles seraient dynamiquement semblables quand ils se déplaçaient selon le même nombre de Froude $Fr = \frac{v^2}{gL}$ où L était la hauteur de l'articulation de la hanche par rapport au sol.

Il a également posé comme principe que les mouvements géométriquement semblables exigeaient des valeurs égales à la longueur relative du pas, le rapport λ/L sans dimension (où le λ était la longueur du pas). Puis, basé sur des données de mammifères aussi divers que les gerbilles (sorte de petits rongeurs⁴³⁷), les hommes et les chevaux, il a tracé les coordonnées Fr selon une fonction logarithmique de λ/L et établi la relation empirique :

$$\frac{\lambda}{L} = 2.3 \left(\frac{v^2}{gL} \right)^{0.3} \quad \text{Équation 22}$$

Cette équation pourrait alors être réécrite comme :

$$v = 0.25g^{0.5}\lambda^{1.67}L^{-1.17} \quad \text{Équation 23}$$

⁴³⁵ Alexander R. M. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 1976, 261, p. 129-30.

⁴³⁶ Froude W. On useful displacement as limited by weight of structure and of propulsive power. *Trans. Institution of Naval Architects*, 1874, 15, p. 148-55.

⁴³⁷ Rongeur de petite taille, qui vit dans les steppes africaines.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

g est connu ($9,8 \text{ m/s}^2$), λ se mesure directement à partir des empreintes de pas de dinosaure et de L s'estime à partir des squelettes intacts de dinosaure, donc v peut être aisément calculé.

Les vitesses estimées se révèlent plutôt faibles, entre 1,0 et 3,6 m/s, tout en sachant qu'il est difficile de savoir si les empreintes étaient faites quand les dinosaures marchaient ou couraient⁴³⁸. D'autres auteurs ont utilisé l'approche d'Alexander⁴³⁹, depuis un autre site d'empreintes prouvant que certains dinosaures réalisaient des vitesses jusqu'à 11 m/s⁴⁴⁰. Tandis qu'Alexander continuait à affiner le rapport entre la longueur du pas relatif et Fr , la parution du film *Jurassique Parc* au début des années 90 a abouti à d'autres discussions au sujet de la vitesse maximale à laquelle un dinosaure bipède pouvait fonctionner. En utilisant des arguments basés sur les nombres de Froude aussi bien que la force des os, Alexander a conclu que le *Tyrannosaurus rex* n'était probablement pas rapide.

Un des articles le plus cité d'Alexander sur l'hypothèse dynamique de similitude⁴⁴¹, note que les mouvements des quadrupèdes au galop comme les chats et les rhinocéros sont remarquablement semblables bien que ces animaux soient différents. Il propose pour cela cinq critères dynamiques de similitude⁴⁴² : (1) chaque jambe a le même rapport de phase ; (2) les pieds correspondants ont des facteurs de fonction égaux (pourcentage de cycle en contact avec le sol) ; (3) les longueurs relatives de pas (c'est-à-dire sans dimension) sont égales ; (4) les forces sur les pieds correspondants sont des multiples égaux du poids corporel ; et (5) les puissances développées sont proportionnelles au poids corporel multiplié par la vitesse. Il a présumé, puis expliqué en démontrant expérimentalement, que les animaux rencontrent ces cinq critères quand ils se déplacent à des vitesses qui traduisent des valeurs égales de Fr . Bien qu'Alexander ait développé l'hypothèse de similitude dynamique pour les animaux quadrupèdes, elle peut également être appliquée à la démarche des bipèdes⁴⁴³.

⁴³⁸ Alexander R. M. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 1976, 261, p. 129-30.

⁴³⁹ Thulborn R. A. Estimated speed of a giant bipedal dinosaur. *Nature*, 1981, 292, p. 273-4.

⁴⁴⁰ Farlow J. O. Estimates of dinosaur speeds from a new trackway site in Texas. *Nature*, 1981, 294, p. 747-8.

⁴⁴¹ Alexander R. M., Jayes A. S. A dynamic similarity hypothesis for the gaits of quadrupedal mammals. *Journal of Zoology*, 1983, 201, p. 135-52.

⁴⁴² Alexander R. M. *Exploring biomechanics. Animals in motion*. New York: Scientific American Library, 1992, p. 36-40.

⁴⁴³ Alexander R. M. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *International Journal of Robotics Research*, 1984, 3(2), p. 49-59.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

D'Arcy Thompson a utilisé le nombre de Froude pour comparer les vitesses de marche de personnages de différentes tailles. C'est effectivement l'un des avantages principaux du nombre de Froude, notamment pour son application dans l'étude de la démarche des enfants⁴⁴⁴ ; Alexander⁴⁴⁵ a prouvé que si la longueur de pas sans dimension était tracée selon la vitesse sans dimension β alors les données pour des enfants âgés de quatre ans étaient identiques à celles des adultes. où :

$$\beta = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \sqrt{Fr} \quad \text{Équation 24}$$

Il utilisa ce rapport empirique pour prévoir les vitesses de marche pour deux petits hominidés (avec des tailles estimées de 1,19 et 1,39 m) qui laissèrent leurs empreintes de pas dans la cendre volcanique à Laetoli dans l'Est de l'Afrique il y a 3,7 millions d'années⁴⁴⁶. Alexander a estimé des vitesses respectivement de 0,64 et 0,75 m/s, qui correspondent à la marche des humains modernes dans les petites villes⁴⁴⁷. Ces différentes études montrent l'intérêt de l'utilisation du nombre de Froude dans le répertoire de la compréhension anthropologique de la locomotion. Ce qui était déjà présumé dans les lois de proportions corporelles s'est généralisé sur les modes de locomotion ; des similitudes se dégagent pour démontrer des constances sur des rapports de variables très dissemblables.

4) La théorie Constructale : Adrian Bejan

Pascal Pic et ses collaborateurs dans le livre intitulé *La plus belle histoire des animaux* (2000) indiquent sur le plan anthropométrique ce que d'autres auteurs supposés déjà dans l'antiquité : « *Les animaux paraissant très éloignés les uns des autres sont, en fait, bâtis sur le même schéma corporel. La forme externe se modifie, mais les schémas d'organisation interne restent fidèles à leur passé évolutif. Par exemple, le radius, l'humérus et les os carpiens d'un bras chez un être humain sont les mêmes chez une chauve-souris ou un dauphin. Les membres de tous les vertébrés sont disposés de façon similaire, mais leur forme et leur taille se sont adaptées à des modes de vie différents.* »⁴⁴⁸ Il en est ainsi de la locomotion tributaire de ces mêmes segments et muscles locomoteurs : que les animaux nagent, courent ou volent, il est possible de dégager des

⁴⁴⁴ Sutherland D. The development of mature gait. *Gait Posture*, 1997, 6, p. 163-70.

⁴⁴⁵ Alexander R. M. Stride length and speed for adults, children, and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 1984, 63, p. 23-7.

⁴⁴⁶ Leakey M. D., Hay R. L. Pliocene footprints in the Laetoli Beds at Laetoli northern Tanzania. *Nature*, 1979, 278, p. 317-323.

⁴⁴⁷ Alexander R. M. Stride length and speed for adults, children, and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 1984, 63, p. 23-7.

⁴⁴⁸ Picq P. et al. *La plus belle histoire des animaux*. Paris : Editions du Seuil, 2000, p. 35.

lois communes aux différents modes de locomotion et indépendantes de l'espèce considérée. Ces lois peuvent s'exprimer sur la base d'idées unificatrices basées sur des lois de dépenses minimales d'énergies et différentes lois d'échelles. Il en est ainsi de la théorie constructale.

1. Principes généraux de la théorie

La théorie constructale a été créée à la fin des années quatre-vingt-dix par Adrian Bejan enseignant chercheur dans les domaines scientifiques de l'énergétique - thermique et de la mécanique des fluides. Le terme « Constructal » inventé par ce même auteur, est issu du verbe latin *construere* (construire), afin de désigner, du point de vue de sa théorie, les formes naturellement optimisées au travers du temps. Il propose de nouveaux principes déterministes de structuration géométrique des systèmes naturels. Il suppose que les contraintes et objectifs de l'ingénierie sont aussi ceux qui gouvernent la géométrie des flux dans la nature, tels que les réseaux hydrologiques, la croissance des arbres et que certaines formes proviennent d'un processus d'optimisation constructal ou les choses s'agrègent, se construisent du petit vers le grand.

L'une des idées originales, évoque l'optimisation du déplacement des fluides, par minimisation des déperditions énergétiques énoncé comme suit par Adrian Bejan : « *Pour qu'un système fini puisse persister dans le temps, il doit évoluer de manière à offrir un accès facilité aux flux qui le traversent* »⁴⁴⁹. La Loi constructale représente les principes qui génèrent et optimisent les formes, les trajectoires les plus adéquates possibles de n'importe quel flux qui s'écoule dans des circuits, nécessairement confrontés à des résistances, des diffusions, des frottements qui détournent l'énergie vers des lieux où elle devient inexploitable. Cela peut concerner aussi bien : les inserts à haute conductivité, les trafics d'automobiles, les ruisseaux et les rivières, les voies aériennes et les bronches des poumons, les capillaires, les artères et les veines du système sanguin, les ramifications des arbres que la locomotion des animaux.

Ce fondement théorique qui propose que les formes s'engendrent non pas par fragmentation, mais par construction et optimisation, organise les échelles dans l'espace, de la plus petite vers la plus grande. La théorie constructale se révèle prédictive par l'application d'un seul et unique principe d'optimisation, mais aussi réaliste, une

⁴⁴⁹ Bejan A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

taille finie prédite pour la plus petite structure ainsi que très générale pour proposer une organisation spécifique à chaque échelle selon les lois en jeu.

2. Les effets de l'inertie et du frottement sur le coût énergétique

Cette théorie qui évoque le principe que les systèmes d'écoulements, de flux, évoluent en gaspillant un minimum d'énergie utile concerne aussi la locomotion dans sa relation avec un coût métabolique minimisé. En effet, le coût métabolique du mouvement d'une masse donnée d'un animal sur une certaine distance dépend de facteurs purement physiques comme l'inertie et les frottements. *L'inertie* représente la tendance qu'a une masse à résister à l'accélération, tandis que le *moment* d'inertie concerne la tendance qu'a une masse en mouvement à conserver sa vitesse. Ces concepts intimement associés, comme les effets dus aux deux propriétés, sont souvent confondus dans le terme d'effets de l'inertie.

Chaque objet possède à la fois une inertie et un moment proportionnel à sa masse. Plus les animaux sont gros, plus leur inertie est grande et plus leur moment d'inertie est important pendant le mouvement. Les grandes forces d'inertie qui peuvent prédominer pendant l'accélération chez un gros animal interviennent de façon significative au cours de l'utilisation d'énergie durant ce mouvement. Les petits animaux, comme les petites voitures et les petits avions, ont moins besoin d'énergie pour accélérer jusqu'à une vitesse donnée et inversement, ils ont besoin d'assez peu d'énergie pour décélérer. Par conséquent, les petits animaux démarrent et arrêtent plus rapidement un déplacement que les gros animaux qui ne peuvent accélérer que lentement après le début d'un mouvement et ne peuvent ralentir que progressivement quand ils doivent cesser d'avancer. De la même façon, chez les animaux terrestres, les membres participent à des mouvements de va-et-vient pendant la locomotion. Ils sont soumis à des forces d'inertie qui dépendent de leur masse lorsqu'ils accélèrent ou décélèrent. Les membres des gros animaux ont une plus grande inertie et un plus grand moment que ceux des petits animaux.

Pour la raison que les animaux ne se déplacent pas dans le vide, l'énergie d'un mouvement prolongé est modifiée par les propriétés physiques du gaz ou du liquide dans lequel ils se déplacent. Le frottement est une force exercée en sens opposé au déplacement de l'animal ; il résulte de la viscosité et de la densité du fluide environnant l'animal. Le frottement dans un milieu donné dépend de la vitesse, de la surface et de la forme de l'objet. Pour un objet de forme définie, le frottement dépend de la surface.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

De nombreux animaux volumineux ont un faible rapport surface/masse, ils subissent donc moins de frottements par unité de poids que les petits animaux pour lesquels la compensation du frottement nécessite une plus grande dépense d'énergie. Quand il se déplace, un animal important dépense moins d'énergie par unité de poids pour se propulser à une certaine vitesse qu'un petit animal de même type. Le frottement est aussi proportionnel au carré de la vitesse d'un animal, ce qui signifie que l'énergie requise pour compenser les frottements et propulser l'animal augmente quand la vitesse s'élève.

Ces effets sont bien plus importants dans l'eau que dans l'air, puisque la viscosité et la densité de l'eau s'avèrent plus élevées que celle de l'air. Le frottement exercé sur un objet qui se déplace dans l'eau est donc plus important. Le frottement se montre tout particulièrement important pendant la nage et le vol, car l'animal qui nage rencontre la viscosité de l'eau et celui qui vole rapidement augmente les frottements dus à l'air. Le frottement est de moindre importance chez les coureurs, car les vitesses atteintes restent insuffisantes pour mettre en cause la viscosité de l'air.

3. Course, nage, vol : motricités distinctes

À première vue, la course, la nage et le vol présentent d'importantes différences et celles-ci ont longtemps été explorées par les mécaniciens, puis les biophysiciens. Quand on compare le coût énergétique de la nage, du vol et de la course pour une masse donnée sur une certaine distance, on constate que la locomotion terrestre (la course) est la plus coûteuse, alors que la nage représente la locomotion la plus économique. Un poisson qui nage dépense moins d'énergie qu'un oiseau en vol dans l'air, car le poisson dispose d'une flottaison neutre alors que l'oiseau doit utiliser de l'énergie pour rester en l'air. Mais pourquoi la course est-elle moins efficace que la nage ou le vol ?

La course diffère des autres locomotions par l'utilisation différente des membres et cela rend le travail fourni pendant la course moins efficace. Quand un bipède ou un quadrupède court, son centre de gravité monte et descend à chaque pas. Le centre de gravité monte quand le pied et les extenseurs des pattes poussent le corps vers le haut et en avant. La descente se produit à cause de l'inévitable gravité exercée sur le corps qui le ramène vers le sol entre deux extensions des muscles. Cette activité est peu efficace, car les extenseurs qui agissent contre la gravité et qui se contractent pour propulser le centre de gravité vers le haut et en avant, doivent aussi interrompre la descente qui précède le mouvement suivant. Les muscles extenseurs doivent dépenser de l'énergie

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

pour résister à l'étirement produit par la descente du corps et en réduire la vitesse pour préparer le mouvement suivant. Une telle utilisation de l'énergie, servant à compenser la gravité, représente un travail négatif. L'homme ou l'animal ressent ce travail négatif fourni par les muscles extenseurs des jambes lorsqu'il descend un chemin très en pente.

En bref, la course, ou la marche, est une locomotion moins efficace que le vol ou la nage, car les muscles doivent être utilisés pour la décélération (travail négatif) aussi bien que pour l'accélération (travail positif). Par exemple, une raison qui explique l'intérêt du déplacement à bicyclette ou sur tout autre engin et son efficacité (et le fait que l'on puisse pédaler longtemps sur de grandes distances) réside dans le fait que le centre de gravité reste stable contrairement à la marche ou à la course. Cela signifie qu'il y a plus d'énergie musculaire consacrée à la propulsion dans ce moyen de locomotion.

Les contraintes de l'environnement imposent des limites et des exigences pour la forme et la fonction des animaux. Les forces de frottement sont plus importantes dans l'eau que dans l'air et les animaux aquatiques doivent être bien profilés pour les réduire. Les animaux aquatiques ont une densité proche de celle de leur milieu, ce qui n'existe pas pour les animaux aériens dont la densité est très supérieure à celle de l'air. La gravité joue un rôle important dans les déplacements des animaux terrestres, alors que cet effet est bien moindre pour les animaux aquatiques. Chez les animaux terrestres, le sang tend à s'accumuler dans les veines et divers mécanismes assurent un retour sanguin adéquat vers le cœur, contre la gravité. La girafe doit avoir une peau épaisse et résistante autour des membres inférieurs pour éviter la stagnation du sang dans les veines des pattes. Ce problème n'existe pas chez les poissons et chez d'autres animaux aquatiques. Cependant, chez ces animaux, le mouvement imprime des forces importantes sur la surface du corps qui peuvent interférer avec le retour veineux. De ce fait, au moins chez les poissons, les veines importantes se trouvent au centre du corps.

4. Une loi unificatrice pour les différents modes de locomotion⁴⁵⁰

Prenant en compte les principes thermodynamiques utilisés pour construire des véhicules efficaces, les auteurs constatent que malgré des différences mécaniques entre ces types de locomotions, tous ces mouvements se réduisent à la gravité, la densité et la masse.

⁴⁵⁰ Bejan A., Marden J. Locomotion : une même loi. [Constructing Animal Locomotion from New Thermodynamics Theory. American Scientist. The magazine of sigma XI, the scientific research society. Volume 94, n°4, 2006.] *Pour la science*, 2006, 346, p. 68-73.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

Aujourd'hui, une approche empruntée à l'ingénierie, tout comme ce fut le cas avec la mécanique appliquée aux automates, propose une vision des propriétés physiques partagées par les différents types de locomotions animales. La locomotion considérée comme le déplacement d'une masse d'un point à un autre peut s'assimiler à un flux. En effet, la locomotion animale, de même qu'un autre écoulement ou mouvement de matière, s'est optimisée chez certains au cours du temps pour effectuer la plus grande distance en dépensant le moins de quantité d'énergie. Comment ce principe d'optimisation des architectures pour favoriser le débit des fluides en écoulement peut-il se généraliser et s'appliquer à la locomotion ?

Les auteurs ont développé un raisonnement analytique constructal, qui pourrait prévoir de nombreuses caractéristiques fonctionnelles ou de formes dans la locomotion animale, depuis l'étude des vitesses, des forces, des fréquences, des masses, dans les foulées, les battements d'ailes. Cette théorie stipule principalement que pour qu'un système de taille finie perdure, il doit évoluer de façon à fournir un accès de plus en plus aisé aux flux qui y circulent.

En effet, il est possible de dégager des lois quantitatives communes aux différents modes de locomotion et indépendants de l'espèce considérée. Malgré de nombreuses différences entre les animaux, on relève souvent des convergences. Comme le notent Adrian Bejan et James Marden : « *On constate que la fréquence des foulées des vertébrés coureurs est, grosso modo proportionnelle à l'inverse de leur masse corporelle M élevée à la puissance $1/6$, c'est-à-dire proportionnelle à $M^{-1/6}$, or la fréquence de nage des poissons est aussi de manière identique proportionnelle à $M^{-1/6}$. De même, la vitesse des animaux coureurs est approximativement proportionnelle à $M^{-1/6}$, tout comme celle des oiseaux qui volent. Et la force par unité de masse déployée par les muscles des animaux coureurs, nageurs ou volants reste remarquablement proche de 60 newtons par kilogrammes.* »⁴⁵¹ Pour expliquer ces lois dites échelle qui s'appliquent à des organismes spécifiques les chercheurs centrent leurs études sur la détermination de constantes communes comme la vitesse de contraction des muscles ou les efforts maximaux supportables par la structure corporelle. Des relations empiriques que les observations de Borelli sur la force de contraction musculaire « loi de Borelli » ou celles de Galilée sur la résistance des os essayèrent d'établir et de généraliser au XVII^e siècle.

La nature a développé différents modes de déplacement, cependant il convient de les analyser selon le principe d'optimisation fondamental d'une déperdition énergétique

⁴⁵¹ Bejan A., Marden J. Locomotion : une même loi. *Pour la science*, 2006, 346, p. 68-69.

Partie III. Chapitre 4. Lois des proportions corporelles

optimale pour trouver du sens à l'évolution des modes de déplacements. Selon la masse des animaux, les techniques de locomotions se différencient pour atteindre des rendements optimaux sur le plan des coûts énergétiques ainsi des lois approximativement communes peuvent se développer.

Conclusion (3)

Jacques Gleyse note dans son livre sur *L'instrumentalisation du corps* que : « Dès le tout début du XIX^e siècle, l'espace discursif concernant l'instrumentalisation rationnelle du corps est redistribué, réorganisé profondément. Et si les strates archéologiques précédentes ne s'effacent pas et affleurent quelques fois en surface, l'énergie, le rendement deviennent les maîtres mots du discours. »⁴⁵²

Les travaux physio mécanique de Marey, Braune et Fisher, des frères Weber, Sherrington, Amar, Rudolf Fick, Duchêne de Boulogne relèvent cette continuité historique pour constituer une étape transitoire déterminée où les progrès technologiques accentueront les avancées théoriques présupposées.

Déjà en 1891 Marey, apôtre borélien, intitule un de ses livres *La machine animale* qui constitue une synthèse d'une multitude d'expérimentations sur l'homme et les animaux. Il désigne ainsi sous le terme de "mécanique animale" l'étude descriptive du mouvement en appliquant les lois de la mécanique et sa modélisation des corps par des tiges articulées. Il est clair qu'aucune analyse sérieuse du mouvement ne peut faire l'impasse aujourd'hui d'une telle étape. Mais, si elle est nécessaire, elle ne se révèle plus suffisante. La biomécanique science expérimentale du mouvement poursuit sa fusion entre la mécanique, l'anatomie, la physiologie, mais aussi les sciences cognitives.

L'exemple de la locomotion animale, entre autres terrestre, révèle une activité complexe qui n'intéresse pas seulement la plupart des articulations des membres inférieurs, mais la totalité du corps. Elle dépend d'un juste équilibre entre plusieurs facteurs notamment : la résistance du squelette du membre inférieur, l'intégrité des articulations qui influence la qualité des appuis (du pied, de la cheville, du genou, de la hanche, de la colonne vertébrale et des membres supérieurs), de la valeur fonctionnelle des structures tendineuses et musculaires, mais aussi des différents constituants du système nerveux périphérique et central, des mécanismes réflexes, des centres de coordination du mouvement et de leur régulation volontaire, de l'état général du sujet, de son équilibre et de ses motivations.

La locomotion est une succession de mouvements cycliques répétitifs sous la dépendance d'apport énergétique. Tout dysfonctionnement des structures osseuses, articulaires, musculaires, neurologiques, périphériques ou centrales vont retentir sur la locomotion avec une mise en œuvre de mécanismes compensateurs. L'analyse du

⁴⁵² Gleyse J. *L'instrumentalisation du corps. Une archéologie de la rationalisation instrumentale du corps, de l'Âge classique à l'époque hypermoderne*. [Chapitre 12. L'homme énergétique]. Paris : L'Harmattan, 1997, p. 231.

Partie III. Conclusion

déplacement a fait l'objet de très nombreux travaux et les méthodes se sont diversifiées au fur et à mesure du développement des technologies. La plupart de ces techniques sont encore complexes et du domaine du laboratoire. Les développements des méthodes de mesures rendent plus accessibles aux spécialistes ces techniques d'évaluation qualitatives et quantitatives du mouvement et permettent d'orienter les thématiques de recherches afin de générer des principes et des théories de plus en plus précises sur la locomotion.

L'une des problématiques principales de l'étude du mouvement se ramène à évaluer la performance de la locomotion et la capacité physique selon l'énergie dépensée. Ces études biomécaniques s'efforcent d'exprimer avec précisions le coût énergétique de ces mouvements, bien que les différentes méthodes empruntées conduisent souvent à des résultats différents. Pour qu'un mouvement locomoteur s'effectue, il est nécessaire que les muscles réalisent un travail mécanique. Le travail mécanique total (W_{tot}) pour assurer le déplacement peut être séparé en deux parties un travail externe (W_{ext}) et un travail interne (W_{int}). Le travail résultant de l'interaction entre le corps et le milieu environnement (sol, air, eau) sert principalement à déplacer le centre de masse du corps, augmenter la vitesse du corps dans la direction du mouvement, à vaincre les résistances ou les forces de friction de l'air ou de l'eau. Le travail interne intervient dans les mouvements qui ne participent pas au déplacement du centre de masse, pour vaincre la résistance ainsi que la viscosité des tissus, mais aussi pour mettre en tension les éléments élastiques « en série » des muscles pendant les contractions isométriques. Les facteurs du W_{ext} peuvent être mesurés avec précisions dans leur intervention sur la locomotion depuis des mesures cinématiques et cinétiques. En effet, on analyse le plus souvent le mouvement sur le plan des forces externes, mais il est aussi possible de l'analyser depuis le W_{int} .

L'approche mécanique qualifiée d'externe s'appuie sur la mesure des déplacements du centre de masse de l'animal. Le travail externe devient la somme des variations d'énergies cinétiques et potentielles calculées depuis le centre de masse. Cette étude offre une indication du coût énergétique et mécanique du mouvement, mais pour préciser l'énergie dépensée à l'intérieur des corps, la mesure des mouvements segmentaires s'avère indispensable selon une approche mécanique. La réalisation de modélisations multi segmentaires représentatives de la constitution de l'animal devient indispensable. L'approche du coût énergétique - mécanique par le théorème de l'énergie

Partie III. Conclusion

cinétique permet de déterminer le travail externe W_{ext} du travail interne W_{int} de l'activité musculaire notamment.

Du point de vue de l'énergie, chaque fois qu'un animal effectue un mouvement, qu'il soit léger, modéré, intense ou maximal, une certaine quantité doit être libérée par leurs organismes. Cette libération de l'énergie ne se produit pas de la même façon selon le type d'effort effectué, ce qui problématise sa quantification. Lorsqu'un animal réalise une course rapide, cela requiert la libération d'une grande quantité d'énergie sur une durée relativement courte et très rapidement. Sur les premières secondes de course, l'animal se trouve au plus fort de sa vitesse, cette puissance diminuera progressivement pour laisser place à une libération d'énergie mécanique faible. À l'opposé pour un mouvement à intensité modérée libre de toute contrainte, l'animal a la possibilité de poursuivre son déplacement sans difficulté. Dans ces deux possibilités pour exécuter un mouvement, une certaine quantité d'énergie se libère indispensable à la locomotion, mais dans des conditions différentes. En effet, dans le premier cas, l'objectif de l'animal était de libérer un maximum d'énergie dans un minimum de temps, alors que dans les processus d'évolution il convient de se déplacer le plus longtemps possible avec un coût énergétique minimisé pour durer.

Il est fascinant de penser que les idées de deux architectes navals du XIX^e siècle pourraient offrir des perspectives utiles pour des scientifiques du XXI^e siècle s'intéressant à la locomotion. Le nombre de Froude, défini comme $\frac{v^2}{gL}$, a trouvé une application générale dans la biomécanique de la locomotion bipède. L'examen de deux paramètres, Fr et la vitesse sans dimension $\beta = \sqrt{Fr}$, ont servi de critère à la similitude dynamique longtemps pressentie chez les anciens dans la recherche de logiques théoriques dans les proportions. Les contributions de William Froude et de son fils Edmund, concepteurs de navires il y a plus de 130 ans, les discernements classiques de D'Arcy Wentworth Thompson qui, dans son opus magnum *On Growth and Form*, épouse l'association entre les mathématiques et la biologie, et les efforts pionniers de Robert McNeill Alexander, qui ont popularisé l'application de Fr à la locomotion animale rejoignent associés l'élaboration de la théorie constructale d'Adrian Bejan et les problématiques de dépenses minimales d'énergie de la théorie de la coévolution animale de Josef Reichholf. La théorie constructale prédit que toutes les structures à système de flux fonctionnent selon le conflit entre deux objectifs : la nécessité de porter des substances du noyau à la périphérie et la nécessité d'éviter la fuite directe de ces

Partie III. Conclusion

substances et de ces énergies (telle que la chaleur) dans les environnements ambiants. D'après la théorie constructale développée par Bejan, alors que la course, le vol et la nage correspondent à des mouvements et à des organismes différents, certaines lois communes, explicables par un principe physique d'optimisation, les caractérisent. En effet, il est possible de dégager des lois quantitatives communes aux différents modes de locomotion et indépendants de l'espèce considérée.

L'approche pluridisciplinaire des phénomènes complexes comme le mouvement génère l'élaboration et l'implication de nouvelles théories. La théorie unificatrice constructale encore peu développée sur des applications locomotrices ouvre de nouvelles perspectives et comme le disait Claude Bernard dans *l'Introduction à la médecine expérimentale* (1865) : « Les théories sont comme des degrés successifs qui monte la science en élargissant de plus en plus son horizon, parce que les théories représentent et comprennent nécessairement d'autant plus de faits quelles sont avancées ». ⁴⁵³

Dans le flot de la vaste explosion de connaissances qui couramment nous submerge, de nouvelles zones de la science sont développées et d'anciennes sont réévaluées. Dans ce processus continu, le langage scientifique est sujet à des changements continuels. Lorsqu'une nouvelle sphère de la science se développe et est reconnue, on lui donne un nom, et l'étendue des zones existantes proches de cette dernière fait l'objet d'un examen minutieux. Il en résulte alors une multiplicité de termes nouveaux, variant d'habitude de quelques nuances de sens, tous prétendant décrire de la façon la plus adéquate le sujet traité par cette nouvelle science.

Le développement croissant d'une approche scientifique de l'analyse des mouvements du corps humain a été altéré par ce problème. À une époque, le terme de kinésiologie (littéralement, science du mouvement) fut utilisé pour décrire l'ensemble des sciences traitant de la structure et de la fonction du système ostéomusculaire du corps humain. Plus tard, l'étude des principes mécaniques applicables au mouvement humain fut largement acceptée comme étant une partie intégrante de la kinésiologie. Plus éloigné encore, le terme fut utilisé de façon beaucoup plus littérale, comprenant les aspects de toutes les sciences qui traitaient d'une façon ou d'une autre du mouvement humain. À ce moment-là, il devient clair que la kinésiologie avait tout à fait perdu son utilité pour désigner de façon spécifique, cette partie de la science du mouvement qui

⁴⁵³ Bernard C. *Introduction à la médecine expérimentale*. Paris : J-B. Baillière fils, 1865, p. 176.

Partie III. Conclusion

concerne soit le système ostéomusculaire, soit les principes mécaniques applicables au mouvement de l'homme.

Plusieurs termes nouveaux furent suggérés comme substituts, ainsi l'anthropomécanique, l'anthropo-cinétique, la biodynamique, l'homocinétique, et la kinanthropologie, eurent tous leurs défenseurs. Parmi tous ceux-ci émergea finalement un terme qui obtint une plus grande faveur que tout autre : la biomécanique. On peut la définir comme les bases mécaniques de l'activité biologique. Elle représente l'application des lois mécaniques aux structures vivantes par l'examen des forces intérieures et extérieures qui y agissent.

Pour que fusionnent l'anatomie et la physiologie, à cette époque il faudra rassembler les images chronophotographiques afin d'élaborer de véritables épures du mouvement, et les associer avec les structures anatomiques qui participent à ce dernier. Dans ce cas, comme le souligne Simon Bouisset⁴⁵⁴ (2002) l'analyse biomécanique présente plusieurs avantages. Elle permet une description objective et précise des postures et mouvements ainsi que leur quantification. Elle s'intéresse aux forces mises en jeu, globalement, au niveau du corps dans son ensemble, ou au niveau de telle ou telle articulation. Enfin, il sera possible de déterminer l'énergie produite au cours du mouvement.

⁴⁵⁴ Bouisset S. *Biomécanique et physiologie du mouvement*. Paris : Masson, 2002.

Partie IV. Sémiophysique sur quelques mouvements sportifs

Introduction (4)

En 1903 Georges Demeny⁴⁵⁵ écrivait : « *C'est de la communion intime du praticien et du savant que doit naître le progrès. Les raisons de sentiment du premier et les vues théoriques du second sont stériles et éternisent les divisions néfastes* », un discours qui se révèle plus intense et indispensable de nos jours, tant la multiplicité et la spécificité des champs scientifiques s'accroissent vers une nécessaire pluridisciplinarité.

Cette nécessité de *communion intime* entre tous les acteurs de la performance reste l'essence de notre investissement dans le secteur de la motricité du sportif. Finalement, tout l'intérêt d'une vie à échanger, pour progresser à travers les autres. Comme la force d'une mêlée se révèle être plus que la somme de chaque force individuelle participant à la poussée, la synthèse culturelle de toutes ces expériences conduit chaque intervenant, aujourd'hui chaque équipe à d'autres interprétations de l'amélioration des performances, en repoussant les limites.

Les études envisagées dans cette dernière partie reprennent fondamentalement cette idée que l'évolution des performances dépend de l'échange des savoirs pratiques et théoriques de l'entraîneur, du sportif et du chercheur. La sensation de l'ajustement technique chez le sportif, ce ressenti physique corporel spécifique n'est accessible fondamentalement que par l'exécutant. L'interprétation des variables enregistrées relève plus de l'instrumentaliste tout comme l'entraîneur semble mieux à même de situer la justesse de la technique selon son patrimoine, son vécu compétitif. Dans ce cadre d'échanges, la technologie participe à conformer les opinions, sur des choix optimaux.

Le but de nos études s'applique à localiser dans la chronologie de l'exécution d'un mouvement, des points et des zones critiques qui le décomposent par phases progressives, mais aussi qui le caractérisent par les intensités des unités de force, de vitesse, de puissance et autres. Finalement, une indispensable phase descriptive cinématique, comme pouvait la réaliser Marey au début du XX^e siècle pour comprendre la marche, la course, le saut. En effet, sous toutes ses formes, il a essayé d'enregistrer, tracer le mouvement⁴⁵⁶ pour mieux le décomposer, le disséquer et analyser sa fonctionnalité.

Comme le note Gleick, en 1991⁴⁵⁷, « *En science comme dans la vie, on sait fort bien qu'une succession d'évènements peut atteindre un point critique au-delà duquel une petite*

⁴⁵⁵ Demeny G. *Les bases scientifiques de l'éducation physique*. Paris : Édition Alcan, 1903.

⁴⁵⁶ Dagognet F. *Etienne-Jules Marey : la passion de la trace*. Paris : Hazan, 1987.

⁴⁵⁷ Gleick J. *La théorie du chaos*. Paris : Editions Flammarion, 1991.

Partie IV. Introduction

perturbation peut prendre des proportions gigantesques », en sport la moindre perturbation d'une habitude peut générer l'échec dans l'exécution d'un mouvement, ce peut être le vent qui perturbe la course d'élan d'un sauteur en longueur, le soleil qui gêne la prise de balle d'un gardien de but, le bruit ou l'agitation du public lors d'un service au tennis... On appellera point critique, d'une fonction différentielle $f(x)$ un point a tel que $df_a = 0$ (la forme linéaire nulle). L'importance est suggérée par la proposition : si $f(x)$, différentiable en a , admet un extremum local en a , alors a est un point critique de f . Rappelons que par extremum local, on entend soit un maximum local [$f(x) \leq f(a)$ pour tout x au voisinage convenable de a], soit un minimum local [$f(x) \geq f(a)$ pour tout x dans un voisinage convenable de a]. De même, une zone critique sera un espace-temps quantitatif et qualitatif stable en deçà et au-delà duquel il y a un changement brusque.

Parmi l'éclectisme des disciplines et des mouvements étudiés, s'exprime initialement et principalement une démarche descriptive pour comprendre précisément par décomposition de phases, les techniques. La précision de ces découpages dépendra de la qualité des instruments de mesure. Au début de nos recherches, principalement sur le saut vertical, l'analyse vidéo avec une simple caméra a représenté une étape initiale de formation à l'étude du mouvement. Elle s'est complétée rapidement d'une table de mixage pouvant associer plusieurs signaux vidéos provenant d'autres instruments de mesure du type : timer (microcontrôleur, permettant la synchronisation avec d'autres appareils et technologies), caméras vidéo, mais aussi plate-forme de forces, capteurs de forces à jauges de contraintes... Nous avons emprunté la méthodologie matérielle utilisée par Didier Chollet⁴⁵⁸ sur la natation, avec l'objectif de faire intervenir les biofeedbacks visuels et sonores comme source d'apprentissage et d'amélioration technique⁴⁵⁹. Avec deux caméras synchronisées, l'analyse cinématique en deux dimensions de la trajectoire d'une barre en haltérophilie lors de mouvements à l'arraché ou l'épaulé-jeté devenait possible ; tout comme l'étude dynamique du système haltérophile barre, mais aussi la détente verticale, l'influence du port de cartable sur l'équilibre des enfants, la décoche lors du tir à l'arc, le lancer franc au basket-ball, la propulsion en canoë-kayak... L'utilisation d'un système opto-électronique en trois dimensions (Elite, Vicon), couplée avec une ou deux plates-formes de

⁴⁵⁸ Chollet D. *L'optimisation de la performance en natation : l'étude spatio-temporelle de la performance en compétition et l'analyse cinématique et cinétique de la nage comme connaissance des résultats et feedbacks d'information pour le nageur*. Université de Montpellier 1 : Habilitation à diriger des recherches en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 1995.

⁴⁵⁹ La réalisation du projet de l'optimisation de la technique chez des haltérophiles de l'équipe de France, dans la perspective de se préparer au mieux pour les Jeux olympiques était dans ce sens.

Partie IV. Introduction

force a permis de développer des analyses plus précises en termes de fréquences d'acquisitions, mais aussi en couplant données cinématiques et dynamiques.

Cette première phase de mes recherches, qui fut sans doute la plus riche sur le plan technologique, a conduit au projet de recherche sur l'optimisation de la performance en haltérophilie depuis l'évaluation biomécanique de plusieurs haltérophiles de haut niveau du club *Clermont Sport Haltérophilie*, appartenant aux équipes nationales du Cameroun et de la France, pour les préparer au mieux pour les Jeux Olympiques d'Australie à Sydney en 2000.

Que ce soit dans l'exécution du saut vertical ou des mouvements haltérophiles olympiques, les concepts de force, vitesse, puissance, travail, énergie se dégagent comme des fondamentaux mécanique et physiologique que l'on retrouve comme constantes dans la majeure partie de mes études, mais aussi de mes thématiques d'encadrements d'étudiants. En effet, les études sur les procédés d'entraînement ayant des conséquences sur la vitesse, la force ou la puissance des sportifs, bien souvent footballeurs, reviennent comme récurrences au cours des années. D'autres concepts ; pliométrie, explosivité, raideur musculaire se greffent pour compléter et éclairer indissociablement de leurs apports physiologiques les discours mécaniques. Comme les courants de pensée iatromathématique, iatomécanique, et iatrochimique qui transparaissent dans l'œuvre de Borelli pour expliquer la vie dans l'étude du mouvement, ces derniers sous d'autres appellations, participent toujours à l'interprétation des performances motrices. Depuis cette logique, comme le note Brénière (1992) au sujet de la biomécanique, qui occupe en filigrane nos préoccupations historique et épistémologique pour sa mise en application « *Le mouvement, autant que l'équilibre, résultent de la conjonction de force d'origine biologique et de forces liées à l'environnement. Tout l'art de la biomécanique moderne, une science encore à ses débuts, est alors de réussir à appréhender le mouvement et les postures dans le cadre de ce double système de forces, qui relève à la fois de la mécanique et du fonctionnement d'un système biologique* ». ⁴⁶⁰

Les études initiales, de la problématique de l'optimisation du saut vertical, l'haltérophilie (Figure 65), mais aussi celles sur le pédalage en BMX, la locomotion en fauteuil roulant ou en handbike, l'équilibre en kitesurf et autres sur le football qui suivront dans la présentation de cette dernière partie, révèlent ce compromis interprétatif physiologique et mécanique (Figure 65).

⁴⁶⁰ Brénière Y. La biomécanique du geste sportif. Recherche, 1992, 245 : 888-891.

Partie IV. Introduction

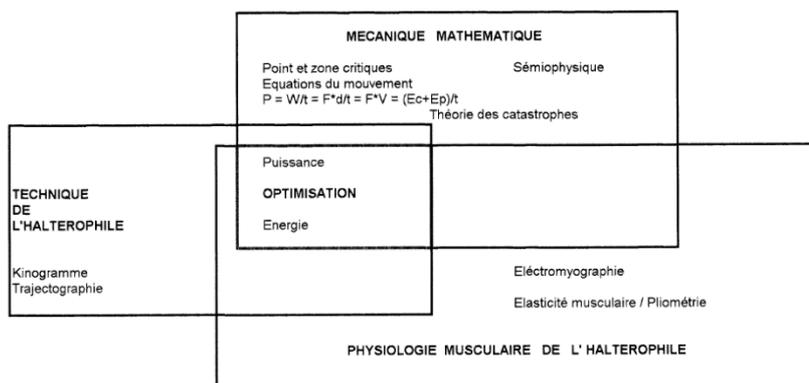


Figure 65. Exemple de problématique sur l'optimisation de la performance en haltérophilie.

Se dégage aussi dans une grande majorité d'études, la volonté de donner du sens aux fluctuations des variables en élaborant des structures géométriques permettant de synthétiser l'interaction d'un grand nombre de ces dernières. On s'est intéressé à la sémiophysique, comme un aspect représentatif possible de l'interaction systémique de variables. Elle concerne d'après Thom (1989)⁴⁶¹ « d'abord la recherche des formes signifiantes : elle vise à constituer une théorie générale de l'intelligibilité ». Par exemple, c'est ce que nous recherchons dans l'élaboration des équations du mouvement du système haltérophile - barre et des courbes représentatives des actions motrices réalisées. En fonction du temps, les courbes de force, de vitesse et de puissance sont des configurations porteuses de sens. La présence de points ou de zones bien matérialisés, facilite la comparaison des haltérophiles et spécifie leurs techniques. Il en est de même pour les caractéristiques cinématiques de déplacement du centre de pression lors des tests en posturologie, ou des joueurs de footballeurs lors de jeux réduits. Il se dessine des logiques dynamiques qui dépassent parfois notre entendement rationnel technique, tactique et autre.

⁴⁶¹ Thom R. *Esquisse d'une sémiophysique : Physique aristotélicienne et théorie des catastrophes*. Paris : InterEditions, 1988.

Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

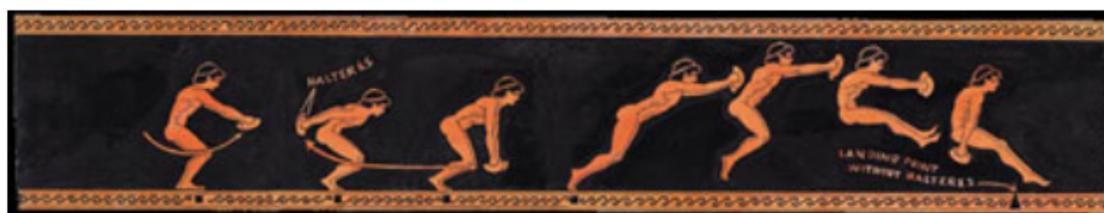
1) Évolution d'une discipline de force vers un sport de puissance

1. Des « poids et haltères » à l'haltérophilie

Dans le domaine de la performance physique humaine, indépendamment des époques, la force représente une des qualités physiques les plus valorisées. Les hommes du passé, la nécessitaient plus que ceux de notre époque, pour accomplir leurs tâches quotidiennes de travail individuel ou collectif. Nos ancêtres devaient compter sur leur valeur physique spécifique pour leur défense personnelle. La force incarnait la protection, mais aussi la domination ou l'élimination des adversaires dans les conflits. Il faudrait remonter jusqu'à l'apparition de l'homme sur terre, pour trouver les procédés d'entraînement qui permettaient le développement de la force physique. Déjà, dans la Grèce Antique, aux Jeux Olympiques, les athlètes utilisaient des haltères, sortes de masses oblongues en pierre taillée ou de plomb, dans l'épreuve du saut en longueur, lors du pentathlon.



a)



(b)

Figure 66. a) Image extrait de Minetti A., Ardigo L. *Halteres used in ancient Olympic long jump*. *Nature*, 2002, 420, 141-142. b) Illustration de Patricia J. WYNNE University of California, Irvine.

Mais c'est surtout au XIX^e siècle qu'un Français Hippolyte Triat (1812-1881) exploite une méthode de développement physique de l'être humain qui inspirera les procédés de leur utilisation à ses successeurs⁴⁶². En effet, dans son gymnase, il centre son travail sur l'utilisation

⁴⁶² Horvath L. *L'évolution historique des méthodes de musculation*. In INSEP Les dossiers de l'entraîneur « Le renforcement musculaire ». Paris : INSEP, 1984.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

d'haltères et de barres, un lieu où les premières barres à sphères à deux mains firent leur apparition avec les appareils à tirage. L'engouement de l'élite de la société parisienne aristocratique et bourgeoise pour les poids et les haltères date de cette période, contribuant ainsi à la création de nombreux gymnases.

Reprenant en les améliorant, les techniques de ce précurseur, Edmond Desbonnet (1867-1953) développera des exercices de musculation analytique avec différentes catégories de poids légers, moyens et lourds. Mais surtout, il élabore les premiers règlements concernant les mouvements techniques compétitifs, avec des records contrôlés et homologués par des arbitres appelés « dynamomètres » de la première Fédération Française de Poids et Haltères (FFPH) qui se constitue à la veille de la Première Guerre mondiale. La création de la Fédération Internationale d'Haltérophilie (IWF), en 1920, à Anvers, prend ses racines historiques dans cette effervescence nationale, sous l'impulsion de quelques Français passionnés ; Jules Rosset (1878-1973) en sera notamment le président fondateur, de 1920 à 1937, puis de 1946 à 1952.

C'est après des débuts hésitants, difficiles, parfois même de rejets, que l'haltérophilie fut inscrite aux Jeux d'Athènes (1896) et de Saint-Louis (1904), mais rayée du programme pour participation insuffisante et réglementation imprécise. L'haltérophilie masculine a toujours été inscrite au programme des Jeux Olympiques, à l'exception des éditions de 1900, 1908 et 1912. Lors de la Première olympiade à Athènes en 1896, les compétitions s'effectuent en extérieur notamment sur le terrain du stade panathénaïque, sur deux épreuves ; levé d'un bras et développé à deux bras ; aucune catégorie de poids ne sépare les athlètes, pour réaliser les performances respectives de 71 kg et 111,5 kg.

Cette spécialité de « poids et d'haltères » figurait au programme parmi les disciplines sportives optionnelles, car discipline très jeune, ses règles n'étaient pas encore codifiées sur le plan international. L'haltérophilie sera inscrite définitivement et régulièrement aux jeux Olympiques qu'à partir des JO d'Anvers en 1920. Depuis 1928, trois mouvements olympiques normalisés dans la durée seront exécutés à deux bras comme le développé, l'arraché et l'épaulé-jeté. Cependant, en raison des difficultés d'arbitrage et de la dangerosité de l'épreuve, en effet de nombreux haltérophiles se contorsionnaient pour performer, le développé sera supprimé après les JO de Munich en 1972 (Figure 67). Les principales modifications interviendront par la suite sur le changement de catégories de poids⁴⁶³.

⁴⁶³ Des Jeux d'Anvers, en 1920 jusqu'aux Jeux de Berlin en 1936, les catégories de poids furent les suivantes : Plumes (60 kg), Légers (67,5 kg), Moyens (75 kg), Mi-Lourds (82 kg), Lourds (90 kg). En 1948, les jeux de Londres virent l'apparition de la catégorie Coq (56 kg). En 1952, à Helsinki, ce fut la création de la catégorie Lourd-Léger (90 kg) la limite des Lourds, passant à 100 kg. En 1972 à Munich, les catégories Mouche (52 kg) et

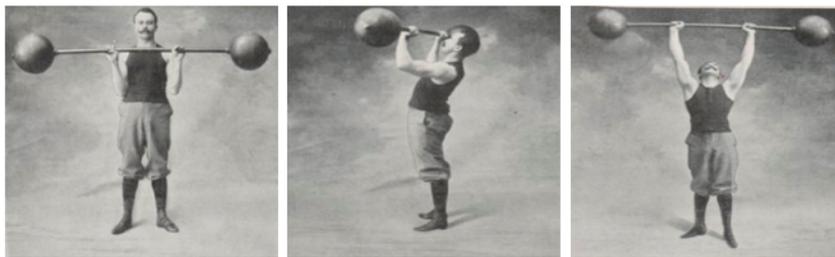


Figure 67. Développé à deux bras. Premier temps, Position du corps, Deuxième temps. (Extrait Desbonnet E. Les poids et haltères. In P. Moreau, G. Voulquin. Les sports modernes illustrés. Encyclopédie sportive illustrée. Paris : Larousse, 1906, p. 263-269.

Cent vingt ans après les JO d'Athènes, aux JO de Rio, les compétiteurs sont maintenant classés en 8 catégories de poids de corps, de sportifs les plus lourds (+105 kg) aux plus légers (- 56 kg) et rivalisent sur deux mouvements olympiques : l'arraché et l'épaulé-Jeté. Lors de trois essais respectifs, ils doivent soulever la plus lourde charge, l'addition de la meilleure performance dans chaque mouvement détermine le vainqueur. Depuis leurs premières participations, en 2000 aux JO de Sydney, les femmes classifiées en sept catégories de poids rivalisent aussi sur ces deux mouvements.

Ces détails montrent que la problématique de l'analyse de l'évolution des performances de la force, plus précisément de la puissance, sur la longue durée, se révèle délicate pour une discipline qui a changé de nombreuses fois de catégories de poids et parfois de mouvements compétitifs. Les épreuves à l'arraché et à l'épaulé-jeté avec deux bras, existent depuis les JO de 1924 à Paris jusqu'à nos jours et peuvent servir d'éléments de comparaison entre sportifs sur pratiquement un siècle. Toutefois, il convient de relativiser ces analyses vis-à-vis de l'évolution technologique, matérielle⁴⁶⁴ et compétitive⁴⁶⁵. La figure 68, montre dans les années vingt, les conditions initiales vétustes, presque rustres de la pratique de l'haltérophilie, notamment la surface de la pratique, constituée de sable et l'utilisation d'haltères spécifiques, dont les masses de formes rondes se vissées.

super-Lourd (supérieur à 110 kg) furent à leur tour intégrées au programme des compétitions nationales et internationales.

⁴⁶⁴ Barre olympique avec manchons rotatifs, disques en caoutchouc...

⁴⁶⁵ La présence d'autres mouvements compétitifs, comme le développé.

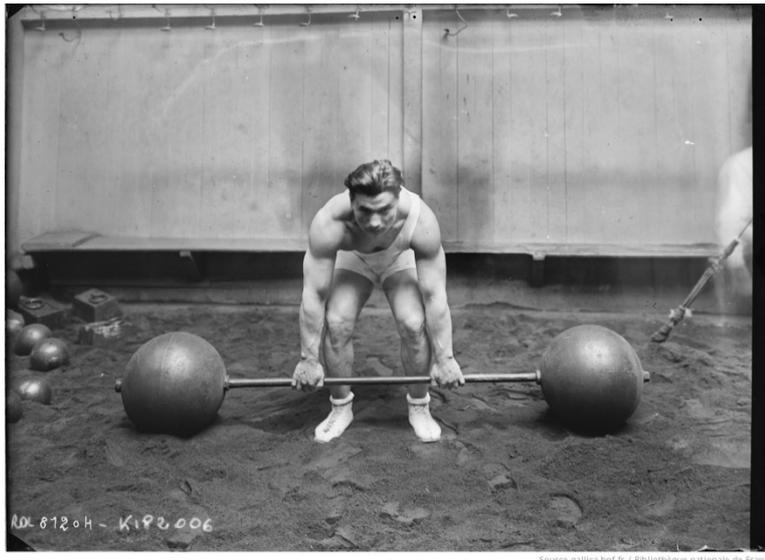


Figure 68. Ernest Cadine (1893-1978), premier champion olympique français dans la catégorie des mi-lourds à Anvers en 1920 (90 kg à l'arraché d'un bras, 85 kg à la volée d'un bras, 100 kg à l'arraché à deux mains, 95 kg au développé à deux bras, 141 kg au jeté à deux bras). Il exécute sur cette photo le premier temps du jeté à deux mains, au départ du soulevé de terre. [Extrait : l'Agence Rol. Agence photographique, domaine public, <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb442984337>].

2. Vers une stabilisation des records

La division des performances par le poids de corps des performeurs permet de faire abstraction relativement des différentes divisions par catégories, intervenues au cours de l'histoire, et d'obtenir un indice : charge soulevée par poids de corps. C'est la moyenne de l'ensemble des indices des meilleures performances toutes catégories confondues par olympiade qui apparaît sur la figure 69 pour les hommes depuis 1924 et pour les femmes depuis 2000.

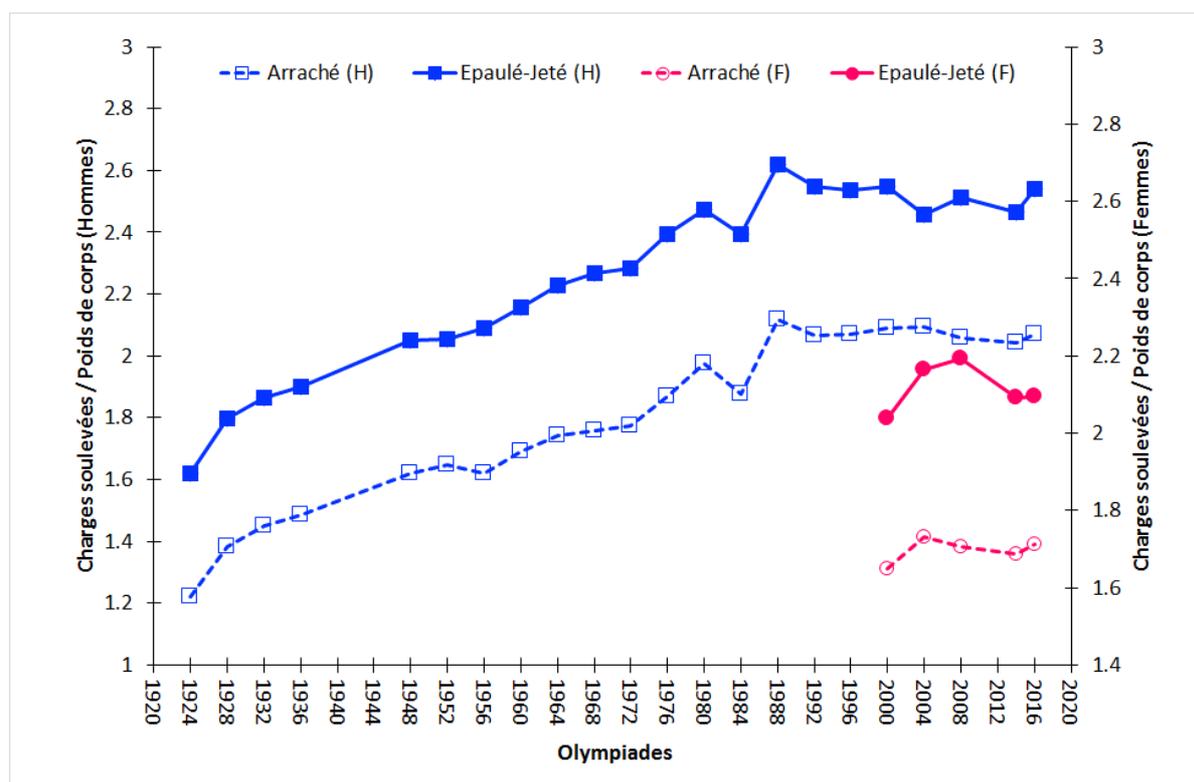


Figure 69. Représentation de l'évolution des performances en haltérophilie, plus spécifiquement à l'arraché et à l'épaulé-jeté lors des Jeux Olympiques. Apparaissent en abscisse les décennies des olympiades et en ordonnées respectivement pour les femmes et les hommes, les moyennes des charges soulevées divisées par le poids de corps des sujets (toutes les catégories confondues des champions olympiques). On perçoit une augmentation pratiquement continue jusqu'aux Jeux Olympiques de Séoul, ensuite, on assiste à une régression puis une stabilisation relative des performances.

Depuis l'origine des compétitions en haltérophilie, les records progressent en continu et de manière maximale jusqu'aux JO de Séoul de 1988, avec une légère baisse quatre ans plus tôt aux JO de Los Angeles. Sur les sept dernières olympiades, on assiste dans l'ensemble à une relative stabilité des résultats, mais avec des records parfois repoussés dans certaines catégories à chaque olympiade, par des sportifs de plus en plus nombreux à pouvoir le faire. Si sur la prise en compte de la totalité des performances olympiques depuis Paris (1924) pour devenir champion il convenait de soulever en moyenne plus de 2 fois son poids de corps (respectivement 1,85 à l'arraché et 2,32 à l'épaulé-jeté) depuis les années 2000 en moyenne il s'agit de 2,29 fois son poids de corps (2,07 ; 2,50). Le constat d'une certaine stabilité s'affiche aussi concernant les femmes participant depuis cinq olympiades. Les résultats montrent que pour se rapprocher des podiums le total olympique doit dépasser 1,9 fois le poids de corps avec un écart de 0,42 entre l'arraché (1,69) et l'épaulé-jeté (2,1). La présence des femmes, depuis seulement 20 ans, laisse espérer d'autres performances qui viendront les rapprocher de celles

des hommes, pour l'instant éloignées en moyenne de 0,38 fois le poids soulevé par kilogramme corporel.

Ces résultats montrent que ces performances, malgré des années d'entraînements et de sacrifices, ne sont pas à la portée de tous, mais qu'il existera quelque part une femme ou un homme qui trouvera le moyen de repousser ses limites pour battre un record. De nos jours, il existe seulement cinq hommes à avoir soulevé trois fois leur poids de corps dans la catégorie des sportifs de moins de 56 kg, reste à savoir quel sera le suivant dans une autre catégorie ou mieux, quelle sera la première femme à passer ce cap, comme il était coutume, il y a fort longtemps celui des 100 kg...

3. Seuil critique des performances aux Jeux Olympiques de Rio

Lorsque l'on compare les performances de Rio avec celles des jeux de Londres, c'est surprenant, elles régressent (Figure 69). En effet, si l'on additionne les meilleures performances de chaque catégorie de poids, on trouve chez les femmes une différence de 64 kg à l'arraché et 85 kg à l'épaulé-jeté. Cette somme divisée par le nombre de catégories, correspond respectivement à presque 10 kg et 12 kg par mouvement et par catégorie. Chez les hommes cette différence est moindre 48 kg et 40 kg pour correspondre à 6 kg et 5 kg. Il s'agit uniquement de calculs effectués sur les vainqueurs ; réalisés sur la totalité des participants, le constat est peu flatteur pour les olympiades précédentes.

En effet, le dopage est une réalité, véritable plaie ouverte, qui affecte cette discipline, au dire de certains sportifs, la stagnation voire même la régression des performances dans cette discipline révélerait un sport plus honnête. Bien qu'il soit très difficile d'arrêter le dopage, les tests semblent de plus en plus efficaces tout en montrant un problème qui perdure depuis des décennies.

En effet, en novembre dernier, le Comité International Olympique (CIO) annonçait que sur douze athlètes des jeux de Londres nouvellement attrapés après des tests rétroactifs, neuf étaient des haltérophiles. Depuis que les échantillons des Jeux de Pékin et de Londres s'exposent à de nouvelles analyses, cela représente pratiquement 50 haltérophiles pris, représentant pratiquement 10% sur la totalité des haltérophiles ayant pris part aux Jeux.

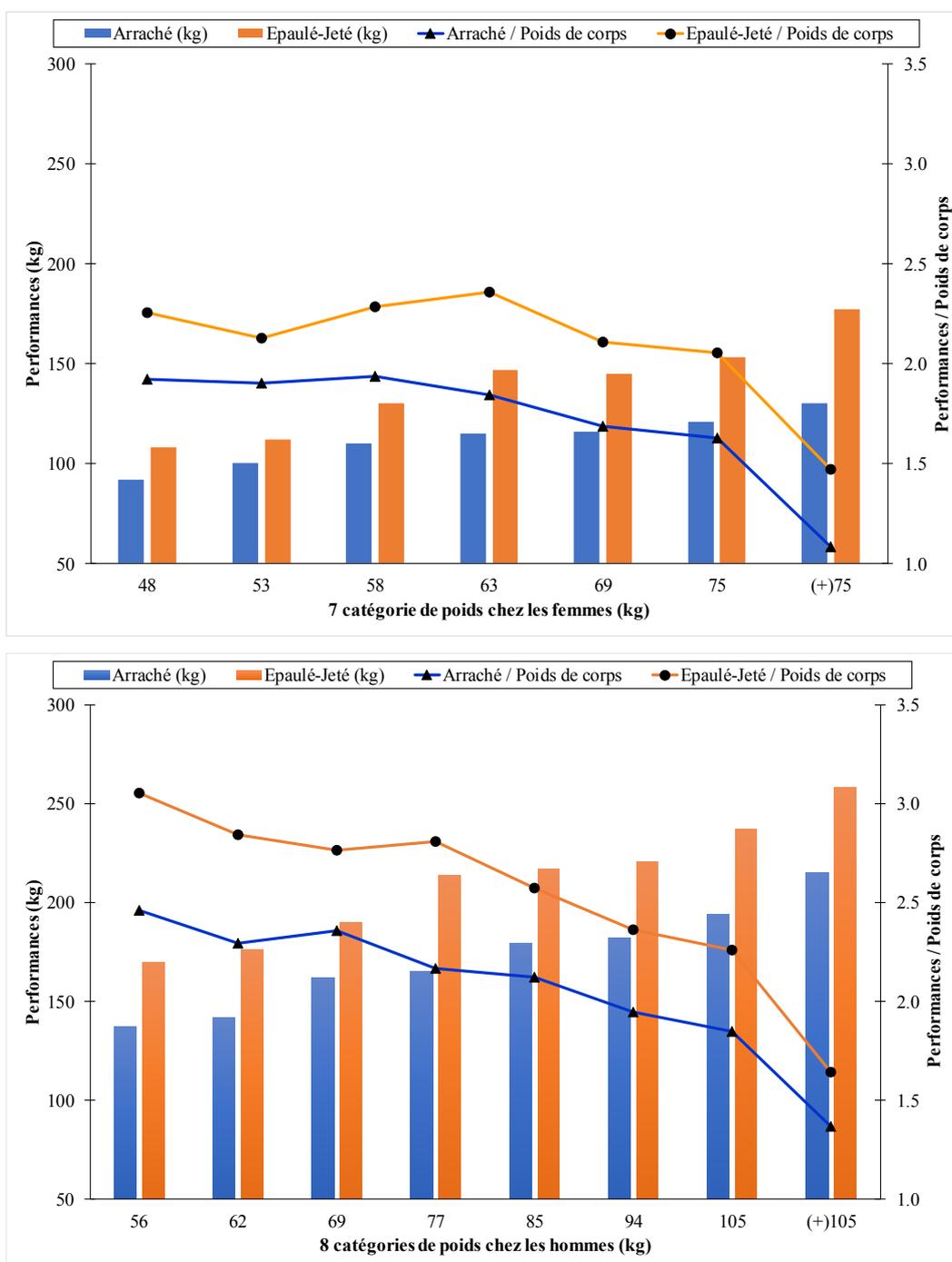


Figure 70. Représentation graphique des performances des champions olympiques de Rio selon les catégories de poids (7 catégories chez les femmes et 8 chez les hommes) à l'arraché et à l'épaulé-jeté (exprimées en kilogrammes sur l'axe principal des ordonnées et par rapport au poids de corps des performeurs sur l'axe secondaire des ordonnées). Les figures permettent de visualiser pour comparaisons femmes-hommes les performances par rapport au poids de corps. Toutes les catégories confondues ce rapport équivaut chez la femme à l'arraché $1,71 \pm 0,28$ et à l'épaulé $2,17 \pm 0,19$ une différence force - technique entre les deux mouvements de $0,38 \pm 0,08$. Chez les hommes les valeurs respectives sont de l'ordre de $2,09 \pm 0,27$ et de $2,67 \pm 0,25$ à l'épaulé-jeté pour une différence entre les mouvements de $0,50 \pm 0,08$ bien supérieure à celui des femmes. La différence entre les hommes et les femmes correspond à $0,46$ pour l'arraché et $0,57$ pour l'épaulé. Le mouvement de l'épaulé favorable à l'expressivité de la force de par son exécution technique contribue à l'écart de performance homme-femme.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

L'haltérophilie pourtant sport peu médiatique se distingue par la fréquence des soupçons, mais aussi des scandales retentissants conduisant à l'éviction parfois d'équipe complète dans cette discipline⁴⁶⁶. À mesure que les pressions exercées augmentent sur les sportifs et que les gains s'élèvent, les tentations s'accroissent sur l'utilisation de substances illicites. À Rio, 99 % des 255 athlètes présents ont été testés avant les jeux, soit au total neuf cent tests, cinq haltérophiles ont été exclus à la suite d'un contrôle positif, alors que déjà l'équipe de la Bulgarie en raison de plusieurs cas de dopage au Stanozolol (un stéroïde anabolisant puissant) avait été privée de Jeux, mais aussi l'ensemble de l'équipe Russe qui ne pouvait participer depuis la révélation d'un « système de dopage d'État » depuis les années 2010, mis en évidence par le constat dramatique du rapport de Richard McLaren le 16 juillet 2016.

Alors que l'haltérophilie reste actuellement le seul sport de force inscrit au programme des jeux olympiques, ses sportifs par l'utilisation de substances illicites exposent cette discipline à son éviction du programme olympique. La fédération internationale d'haltérophilie (IWF) a parfois, volontairement changé les catégories de poids pour mettre en place de nouvelles bases de records plus saines, car, par le passé, l'utilisation intensive de stéroïdes anabolisants (malgré de nombreux effets secondaires irréversibles) avait engendré des records devenus inaccessibles, sous des conditions normales et saines d'entraînement.

4. Les deux mouvements olympiques

L'haltérophilie, sport de manutention de charges lourdes associe sa pratique au respect fondamental des principes ergonomiques de bases et des synergies musculaires et articulaires. Quel que soit le niveau, les sportifs doivent envisager les mouvements sous des bases de minimisation de dépense d'énergie, en optimisant leurs positions d'équilibres, les points de fixation pour générer un maximum de force efficace, réduire les leviers en rapprochant le centre de masse de la barre du centre de gravité du sujet, c'est-à-dire mettre toujours la barre au plus près de son corps (ceci est vrai pour les disques et autres masses et haltères que l'on déplace), mais aussi conserver une bonne rythmique et dynamique du mouvement. Car pour exécuter convenablement les mouvements respectivement à l'arraché et à l'épaulé-jeté, il convient de générer des forces moyennes et de pics, extrêmement élevées depuis des coordinations musculaires et articulaires aux intensités proportionnellement corrélées (Figure 69).

⁴⁶⁶ De Mondenard J.-P. *Dopage aux Jeux Olympiques*. Paris : Amphora, 1996.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

a. Encadré technique

Selon les catégories de poids de corps ; lors de la réalisation d'essais maximaux à l'arraché, la vitesse verticale de la barre notamment pendant la deuxième phase de tirage peut être comprise entre $1,65 \text{ m.s}^{-1}$ et $2,28 \text{ m.s}^{-1}$. Au cours d'essais sous-maximaux ou lors d'entraînements à des exercices d'arrachés (c'est-à-dire principalement en puissance) les vitesses de la barre peuvent dépasser les $3,00 \text{ m.s}^{-1}$, pour élever la barre sur le plan vertical entre 62-78% de la taille de l'haltérophile, avant que ce dernier ne plonge sous la barre tout en y prenant appui. La durée de l'effort, depuis le décollage de la barre du sol jusqu'aux signaux des arbitres de la compétition signalant la validation ou pas de l'essai dure de 3-5 secondes, alors que le tirage peut être réalisé en moins d'une seconde.

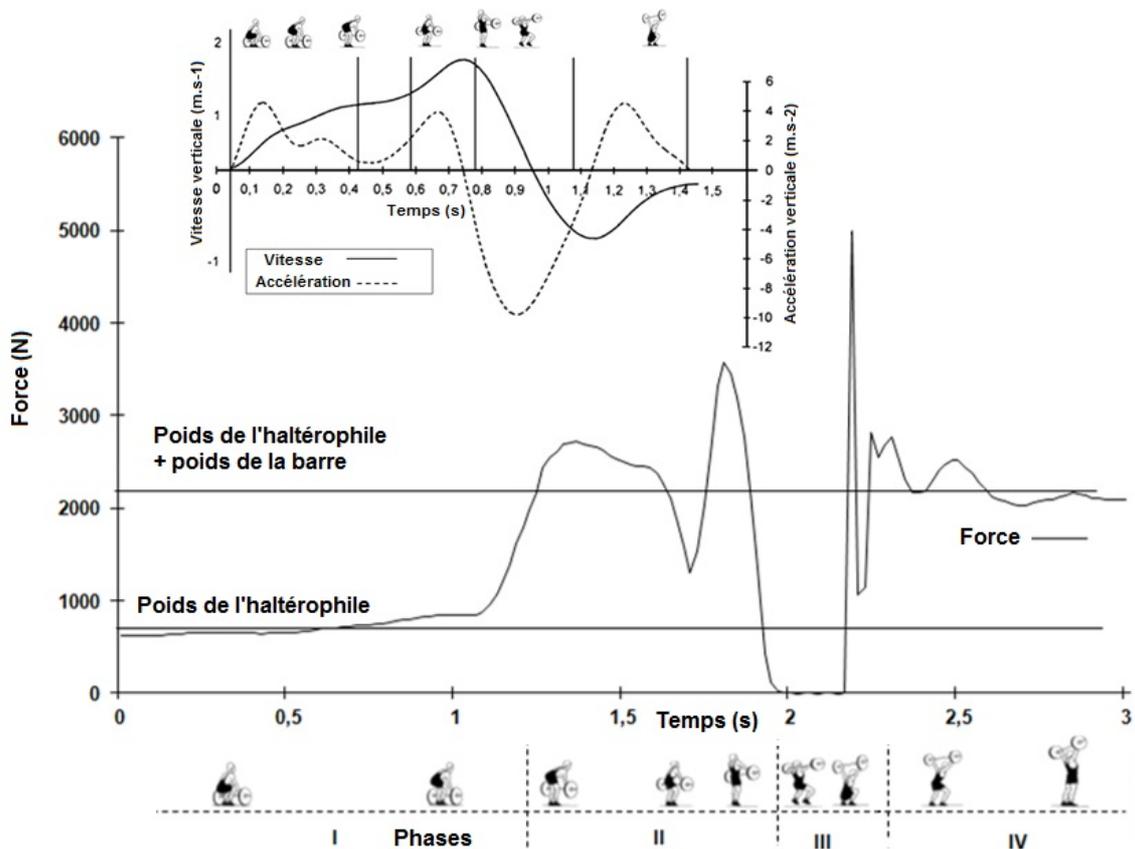


Figure 71. Exemple d'exécution d'un mouvement d'arraché sur une plateforme de forces par un haltérophile de haut niveau. Le schéma principal montre les quatre phases (I. Préparation, II. Tirage, III. Réception et fixation, IV. Relevé et maintien de la barre bras tendus jusqu'au signal des arbitres), la force verticale développée par le sportif (en abscisse le temps, en ordonnée la force en Newton, 2 droites : l'une représentant le poids de l'haltérophile, l'autre le poids total de l'haltérophile avec la barre). Le schéma du dessus exprime la vitesse m.s^{-1} et l'accélération verticale m.s^{-2} de la barre depuis un enregistrement vidéo classique. Il est intéressant de constater pendant le tirage, la présence de deux pics de forces séparés par une régression qui peuvent contribuer à expliquer, la qualité mécanique du tirage, mais aussi l'intérêt physiologie de la pratique de l'haltérophilie, proche de la biomécanique du saut vertical, mais avec charge lourde.

L'épaulé-jeté effectué en deux parties permet de soulever des charges plus lourdes (18-20%) qu'à l'arraché. La prise de la barre moins large qu'à l'arraché, la possibilité de se baisser plus sous la barre et une meilleure stabilité de réception de cette dernière sur les clavicules facilite cet écart. Au cours de la seconde partie du tirage lors des charges limites, la vitesse verticale de la barre cette fois peut varier de $0,88 \text{ m.s}^{-1}$ à $1,73 \text{ m.s}^{-1}$. Cependant, lors de tentatives sous-maximales ou d'exercices similaires d'épaulé, les vitesses des barres peuvent dépasser $2,50 \text{ m.s}^{-1}$. Lorsque la barre s'élève sur le plan vertical à environ 55 - 65% de la taille de l'haltérophile, ce dernier amorce sa chute pour la réceptionner en position de squat complet.

Le jeté qui peut être assimilé à une impulsion de saut vertical pour projeter la barre le plus haut possible et la réceptionner les bras tendus, peut exposer le sportif à une force descendante équivalente à 17 fois sa masse corporelle. Les puissances dégagées lors des essais maximaux sont de 2140 watts pour des haltérophiles de la catégorie des 56 kg et jusqu'à 4786 watts pour la catégorie des plus de 105 kg. Pendant cette période de transition, l'athlète peut être exposé à une force descendante équivalant à 17 fois sa masse corporelle. Les sorties de puissance signalées lors des essais de poussée maximale sont de 2140 watts (W) pour un haltérophile chez les hommes de moins de 56 kg à 4786 W pour un haltérophile de plus de 105 kg⁴⁶⁷.

5. Pourquoi s'entraîner avec des mouvements haltérophiles ?

L'haltérophilie permet le développement de la force et de la puissance, mais cela nécessite une progressivité lente et patiente dans l'apprentissage et la maîtrise des mouvements techniques et semi-techniques spécifiques. La lutte contre la pesanteur oblige un déplacement de la charge rapidement depuis une coordination optimisant les principes ergonomiques et développant l'efficacité du système nerveux à recruter plus de fibres musculaires simultanément. La pratique quotidienne devrait générer par l'augmentation des charges et toujours face à la force d'apesanteur plus de force et de vitesse, donc de puissance, avec un accroissement de la souplesse et une meilleure mobilité fonctionnelle, toujours en gérant au mieux les points d'équilibre et de fixation pour optimiser la coordination. Le transfert des bénéfices acquis en haltérophilie vers d'autres sports est compréhensible, car l'exécution technique des mouvements à l'arraché et à l'épaulé (notamment les tirages), mais aussi des jetés

⁴⁶⁷ Stone MH, Sands WA, Pierce KC, Carlock J, Cardinale M, Newton RU. Relationship of maximum strength to weightlifting performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2005, 37(6) : 1037-43.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

et des sauts verticaux sur plate-forme de forces montre de grandes similitudes de configurations de poussées verticales.

De plus, certaines études invasives, comparant les structures musculaires, montrent les modifications occasionnées par la pratique de l'haltérophilie. En 2003, notamment une équipe de chercheurs de l'université de Memphis dans le Tennessee⁴⁶⁸ (Fry et coll., 2003) a réalisé une étude comparative par biopsies des caractéristiques des types de fibres musculaires, entre un groupe d'haltérophiles et un autre de sujets ne pratiquant pas ce type de sport. Ils analysèrent principalement les types de fibres, mais aussi la chaîne lourde de myosine (MHC), la teneur en titine⁴⁶⁹ et la densité capillaire spécifique des types de fibre. Ils ont montré qu'il existait des différences significatives pour les fibres de types IIC, IIA et IIB le pourcentage de MHC IIA et de MHC IIB et que les haltérophiles présentaient seulement l'isoforme titin-1. Enfin, ils notaient que les performances en haltérophilie et en saut verticaux étaient corrélées principalement avec les caractéristiques des fibres de types II, pas spécifiquement IIB, tout en relevant la présence de pourcentages élevés de fibres musculaires de type IIA et de teneur en isomorphe MHC IIA.

6. Les limites de la force

Les adaptations neuromusculaires impliquant les performances s'effectuent par l'activation des fonctions neurologiques, mécaniques et métaboliques. C'est-à-dire que l'optimisation de la fonction musculaire pour générer une force maximale dépendra de la composition, mais aussi des niveaux d'activations structuraux, mécaniques et neurologiques sollicitant principalement les unités motrices responsables des coordinations intramusculaires et intermusculaires.

Les limites de la force maximale se situent dans les configurations architecturales et mécaniques des muscles notamment les différents éléments ou composants contractiles, élastiques séries et parallèles définis selon les modèles théoriques envisagés (entre autres, modèle initial de Hill en 1938⁴⁷⁰ actualisé par Shorten en 1987⁴⁷¹).

⁴⁶⁸ Fry AC, Schilling BK, Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, Thrush JT. Muscle fiber characteristics and performance correlates of male Olympic-style weightlifters. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 2003, 17(4): 746-54.

⁴⁶⁹ Titine du mot Titan (de grande taille) ou connectine, est une protéine élastique impliquée dans le contrôle de l'assemblage des protéines sarcomériques et qui régule l'élasticité du sarcomère.

⁴⁷⁰ Hill A. V. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of Royal Society London (Biol)*, 1938, 126:136-195.

⁴⁷¹ Shorten M. R. Muscle elasticity and human performance. *Medicine and Sport Science*, 1987, 25: 1-18.

Les méthodes de musculation considérées selon les facteurs participant à la variabilité des exercices du développement de la force notamment les combinaisons des régimes de contractions, les variations des postures et des saisies qui permettent de modifier les mouvements et les trajectoires, les intensités des charges, les processus de récupération ... influencent la physiologie structurale et la mécanique musculaire. Le jeu des combinaisons, agit notamment sur l'hypertrophie, en intervenant dans les liaisons actine myosine pour impacter les aspects neuromusculaires en améliorant les commandes et les régulations de la contraction en favorisant les coordinations intramusculaires et intermusculaires. Il convient de considérer aussi l'influence métabolique sur la performance en force maximale principalement les taux de protéines contractiles et leur métabolisme reposant sur des régulations enzymatiques complexes.

2) De « la fente » à « la flexion » : un exemple de pérégrination technique

Introduction. L'haltérophilie, réservée principalement à quelques hommes forts, fut longtemps considérée comme un spectacle de foire, de place publique ou de cirque, plutôt que comme un sport (Desbonnet, 1911⁴⁷²). Sans réglementation spécifique, les réalisations et les démonstrations des exercices de force étaient l'expression de la puissance physique. Les prouesses de ces « saltimbanques » devaient paraître insurmontables aux spectateurs. La pratique dans les gymnases de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle, véritables temples de la renaissance (Andrieu, 1992⁴⁷³) inspirés par Francisco Amoros y Ondeano (1770-1848) et surtout Hippolyte Triat (1812-1881), a généré, par le choix diversifié et répétitif de mouvements localisés à des groupes musculaires, une certaine rationalité, liée à la recherche de la méthode optimale. La performance dans les exercices, la comparaison des plastiques corporelles, le mimétisme entre sportifs, ont introduit la créativité dans les postures de forces. Les mouvements travaillés sur les agrès et l'inventivité dans l'utilisation des haltères, des massues, des « xylofers » ou de machines ont transformé les techniques (Andrieu, 1988⁴⁷⁴).

Prolégomènes d'une reconnaissance difficile. L'haltérophilie, aux sources olympiennes antiques, a trouvé lentement, dans ce processus gymnique de musculation au fronton de « la régénération de l'Homme », sa voie moderne de constitution comme discipline

⁴⁷² Desbonnet, E. (1911). *Les Rois de la force*. Paris : Berger-Levrault.

⁴⁷³ Andrieu, G. (1992). *Force et beauté. Histoire de l'esthétique en Éducation Physique aux XIX^e et XX^e siècles*. Talence : Presses universitaires de Bordeaux.

⁴⁷⁴ Andrieu, G. (1988). *L'homme et la force*. Joinville-le-Pont : Actio Bazina.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

sportive à part entière. C'est une histoire des tâtonnements de la réglementation des exercices de force, des balbutiements de classifications et de nomenclatures de mouvements techniques : développés, arrachés, épaulés-jetés à un et à deux bras, dévissés d'un bras, volées d'un bras, etc. La diversité des interprétations réglementaires, lors des prémices de compétitions, par les arbitres « dynamomètres », la faible reconnaissance d'une entité nationale (création de l'Haltérophilie Club de France en 1900 par Edmond Desbonnet ; fondation en 1913 de la Fédération Française de Poids et Haltères avec Jules Rosset) et l'absence d'une organisation internationale, finalement structurée en 1946, expliquent que cette discipline sportive, pourtant inscrite aux Jeux d'Athènes (1896) et de Saint-Louis (1904), fut rayée du programme pour participation insuffisante et réglementation imprécise. En effet, les premières compétitions nationales de 1903 à 1910 pouvaient comporter un nombre différent de mouvements, allant parfois jusqu'à 17. Ce sport, en quête de reconnaissance internationale, à la recherche d'une identité commune de compétitions, avec les épreuves du levé à un bras et du levé à deux bras, ne fut inscrit définitivement aux Jeux olympiques qu'à partir de 1920, à Anvers, avec l'arraché à un bras, l'épaulé-jeté à un bras et l'épaulé-jeté à deux bras. Cependant, lors des Jeux olympiques de 1924, les instances ont remplacé les mouvements à un bras contre trois autres mouvements à deux bras, qui sont le développé, l'arraché et l'épaulé-jeté. Le développé fut supprimé en 1972 (Munich), en raison des difficultés évoquées par le jugement et l'arbitrage de ce mouvement, en effet certains sportifs se contorsionnaient dangereusement au risque de handicaps majeurs. Depuis, les sportifs ne pratiquent plus que l'arraché et l'épaulé-jeté. Après des débuts difficiles, hésitants, l'haltérophilie officialisée par la création, le 23 mars 1914, de la Fédération française de poids et haltères puis, sous l'impulsion française, de la Fédération internationale d'haltérophilie, en 1920, présidée jusqu'en 1952, par Jules Rosset, a su réglementer et codifier ses mouvements compétitifs l'arraché et l'épaulé-jeté. Cependant, les progrès dans l'optimisation des techniques et des moyens d'entraînement ont transformé, entre autres, les représentations de leurs conditions d'exécution, provoquant notamment l'abandon de la fente au profil de la flexion. Les bulletins consultés de l'« Haltérophile moderne » de la Fédération Française d'Haltérophilie parus depuis 1946 révèlent les multiples facteurs de cette transformation (Figure 72).

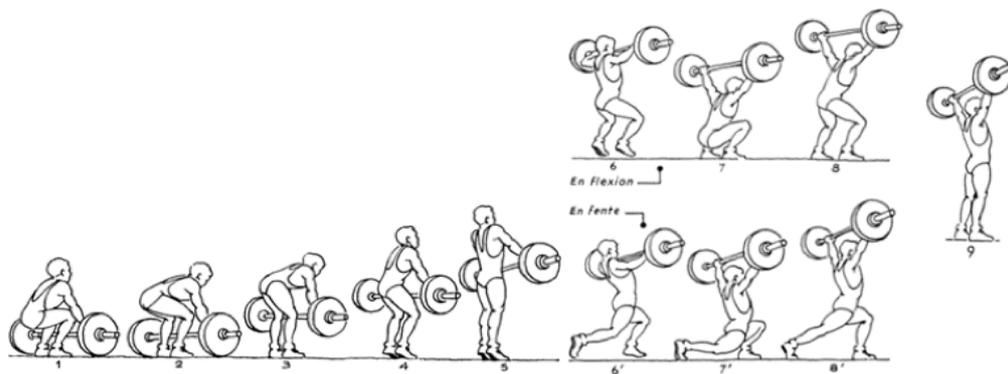


Figure 72. Kinogramme de l'arraché extrait de Lambert (1978).⁴⁷⁵

Métamorphose technique de la réception. Si, à ses débuts, l'haltérophilie faisait l'apologie de la force pure, aujourd'hui, elle réunit l'ensemble des qualités physiques de l'athlète : force, mais aussi vitesse, coordination et souplesse. Sa pratique nécessite une certaine technique afin de soulever convenablement les charges les plus lourdes. Sur le plan biomécanique, les deux mouvements peuvent être comparés dans leurs deux phases constitutives ; l'une ascendante, appelée tirage, et l'autre, descendante, plus ou moins marquée selon l'intensité de la charge, appelée chute ou réception (Lambert, 1978). La différence entre ces deux mouvements réside principalement dans l'écartement de la prise des mains sur la barre, qui oblige à adapter les appuis, les postures, à adopter des mouvements spécifiques. Les écoles techniques du tirage influencent la trajectoire biomécanique de la barre et donc la position verticale et antéropostérieure finale du point mort haut. Le mouvement de réception de la barre en fente « classique », communément adopté par les haltérophiles, c'est progressivement généralisé en flexion, pour être définitivement adopté. Après l'extension totale du corps, en appui sur le sol par la pointe des pieds et tirant la barre à sa hauteur maximale, l'haltérophile passe à un appui sur celle-ci pour accélérer sa chute due à la pesanteur.

Conclusion. Initialement, la fente classique comme mouvement technique procurait une plus grande stabilité et ainsi améliorait le taux de réussite. Cependant, la position dissymétrique de réception générait une légère bascule latérale du bassin et occasionnait donc une torsion de la colonne vertébrale. La position de fixation plus élevée de la barre, compte tenu des limites de l'articulation coxo-fémorale de la jambe arrière, représentait une des limites essentielles de cette technique. De plus, la jambe avant fléchie, supportait lors de la réception un fort pourcentage de la masse de la barre. Les haltérophiles ont progressivement et définitivement

⁴⁷⁵ Lambert, G. (1978). *Haltérophilie : le guide du spécialiste*. Paris : Vigot.

abandonné cette technique au profit de la flexion même si ces changements les obligeaient à faire un compromis entre la stabilité et la possibilité de réceptionner la barre plus bas et donc de gagner en charge, mais avec un risque élevé de déséquilibre comme le notait, à cette période de turbulences techniques, l'entraîneur national Georges Lambert (1960) : « [...] *Suivant ce raisonnement, la technique « en flexion » est plus efficace que la technique classique « en fente », le niveau de réception étant plus bas. Tous les haltérophiles devraient donc tirer en flexion ! Il n'en est rien, car cette technique présente certaines difficultés que nombre d'athlètes sont incapables de surmonter : le geste doit être très précis, car l'équilibre en position accroupie est instable, les pieds étant dans le même plan vertical que la barre ; cette technique demande de plus une certaine souplesse articulaire, car dans la position fléchie, les pieds doivent être posés à plat sur le sol et le dos redressé et droit ; enfin, l'effort de relèvement est pénible surtout si l'athlète n'a pas les membres inférieurs puissants. Toutes ces difficultés font qu'actuellement moins du tiers des haltérophiles tirent en flexion.* »⁴⁷⁶

3) La détente verticale chez l'haltérophile de haut niveau

Cette recherche utilise une plate-forme de forces pour étudier la puissance verticale développée lors de différents types de sauts verticaux. L'étude montre l'intérêt de la pratique de l'haltérophilie pour entraîner une grande majorité de sportifs en quête d'optimisation de performance dans leur discipline de prédilection. Dans les années 1980-1990 peu de travaux scientifiques et biomécaniques en France avaient analysé cette discipline, on pouvait trouver une seule thèse indexée dans le catalogue SUDOC celle de Lazhar⁴⁷⁷ en 1981, ensuite celle de Attia⁴⁷⁸ en 1997 et pour finir la nôtre. Actuellement, l'haltérophilie comme moyen de musculation se développe dans pratiquement toutes les salles de remise en forme, ce qui est vrai aux États-Unis et notamment dans l'État de Californie depuis quelques années, associée comme exercice de CrossFit.

Introduction. Le but de cette étude est de vérifier si la détente verticale constitue un indice de performance en haltérophilie (Garhammer et Gregor, 1992⁴⁷⁹). Les variations de la force verticale depuis une plate-forme de force sont utilisées pour identifier les caractéristiques

⁴⁷⁶ Lambert, G. (1960). Haltérophilie. *Revue Éducation Physique et sportive*, 48, 42-44.

⁴⁷⁷ Lazhar G. *Étude biomécanique d'un mouvement olympique d'haltérophilie : l'arraché à deux bras*. Université Paris 11, thèse en physiologie et biomécanique du mouvement, 1981.

⁴⁷⁸ Attia A. *À propos du renforcement musculaire - analyse mécanique de techniques de soulevés de charge*. Université de Poitiers, thèse de mécanique et physiologie de l'entraînement, 1997.

⁴⁷⁹ Garhammer J., Gregor R. *Propulsion forces as a function of intensity for weightlifting and vertical jumping*. The journal of applied sport science research, 1992, 3: 129-134.

cinématiques et dynamiques de la détente verticale. Les durées des phases, les valeurs des points critiques et des pentes spécifiques sont calculées pour les courbes de force, de vitesse, et de puissance (Dowling et Vamos, 1993⁴⁸⁰; Aragón-Vargas et Gross, 1997⁴⁸¹).

Méthode. Quinze haltérophiles de niveau national et international (Âge 26 ± 5 ans, masse 76 ± 12 kg, indice de performance $1,72 \pm 0,22$ « *performance maximale à l'arraché plus performance à l'épaulé jeté divisées par deux fois le poids de corps* ») ont réalisé trois sauts d'affilée selon trois modalités de sauts (Figure 73) sur une plate-forme de force. C'est-à-dire trois sauts en Squatting Jump (saut effectué depuis une position statique fléchie "SJ"), trois en Counter-movement Jump (saut accompli après une rapide flexion - extension des membres inférieurs "CMJ") et trois en Counter-Movement Jump arm (saut identique au CMJ, mais avec la participation active des bras "CMJa"). La détente verticale (Tableau 1) se calcule en utilisant l'intégration numérique de la force verticale F_z pour obtenir la vitesse de décollage. La puissance mécanique de chaque essai est obtenue en multipliant la force verticale F_z par la vitesse verticale V_v .

$$V_d = \frac{1}{m} \int_{t=\text{début}}^{t=\text{décollage}} (F_z(t) - mg) dt \qquad H_{\max} = \frac{V_d^2}{2g}$$

(H_{\max} = hauteur maximale du centre de gravité (m), v = la vitesse verticale au décollage ($m \cdot s^{-1}$), et g = constante de gravitation ($9,81 m \cdot s^{-2}$).

Résultats. Les résultats montrent qu'il y a des différences significatives ($p < 0.001$) entre les sauts CMJa / SJ et CMJa / CMJ principalement à cause de l'utilisation des bras. Les calculs sur la V_d et H_{\max} ne présentent pas de différences significatives entre les sauts CMJ / SJ, de plus, les trois sauts d'un même groupe de mouvement sont identiques. Nous constatons des corrélations élevées entre les trois sauts d'une même modalité SJ ($r = 0,75$, $p < 0.005$) et CMJa ($r = 0,60$, $p < 0.05$) ce qui n'est pas vrai avec la modalité CMJ. L'indice de performance en haltérophilie est corrélé avec la variable H_{\max} calculée depuis les groupes de sauts SJ ($r = 0,77$, $p < 0.001$) et CMJa ($r = 0,65$, $p < 0.01$). On relève que les pics de force (plus de 2,5 fois le poids du corps) et le pic de puissance positif maximum sont corrélés avec H_{\max} . ($r = 0,95$, $p < 0.01$).

⁴⁸⁰ Dowling J., Vamos L. Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 1993, 9: 95-110.

⁴⁸¹ Aragón-Vargas L., Goss M. Kinesiological factors in vertical jump performance: differences among individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 1997, 13: 24-44.

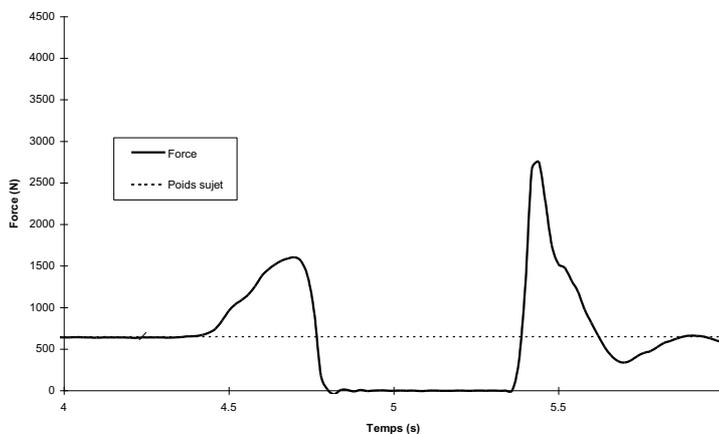
Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

Les durées des phases de travail positif (Parties des courbes au-dessus du poids de corps) sont corrélées négativement avec la hauteur ($r = -0,60$, $p < 0.01$).

Tableau 1. Résultats H_{max} et V_d lors des trois modalités de sauts.

Différents sauts (variables)		(unités)	SJ1	SJ2	SJ3	CMJ1	CMJ2	CMJ3	CMJ1 (Bras)	CMJ2 (Bras)	CMJ3 (Bras)
(H_{max})	Moyenne	(m)	0.44	0.45	0.46	0.44	0.46	0.46	0.55	0.55	0.56
	Ecart type	(m)	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.09
(V_d)	Moyenne	($m \cdot s^{-1}$)	2.93	2.95	2.98	2.94	3.00	2.99	3.26	3.26	3.31
	Ecart type	($m \cdot s^{-1}$)	0.22	0.24	0.22	0.24	0.25	0.24	0.29	0.26	0.29

Discussion. L'exécution des sauts verticaux est déterminée par l'interaction complexe de nombreux facteurs pour optimiser la puissance maximale et notamment la vitesse de décollage V_d . Un des objectifs fondamentaux du saut vertical est d'atteindre la plus grande vitesse verticale au décollage parce que la hauteur atteinte par le centre de gravité du corps, dépend de la vitesse de décollage à la puissance deux. D'une certaine manière, cet objectif est aussi celui des tirages en haltérophilie (arraché et épaulé) qui détermine la vitesse ascensionnelle et la hauteur maximale de la barre avant de passer dessous. Cette "similitude d'objectifs" dans les sauts et les tirages des mouvements olympiques se retrouve dans leurs patterns cinématiques et dynamiques.



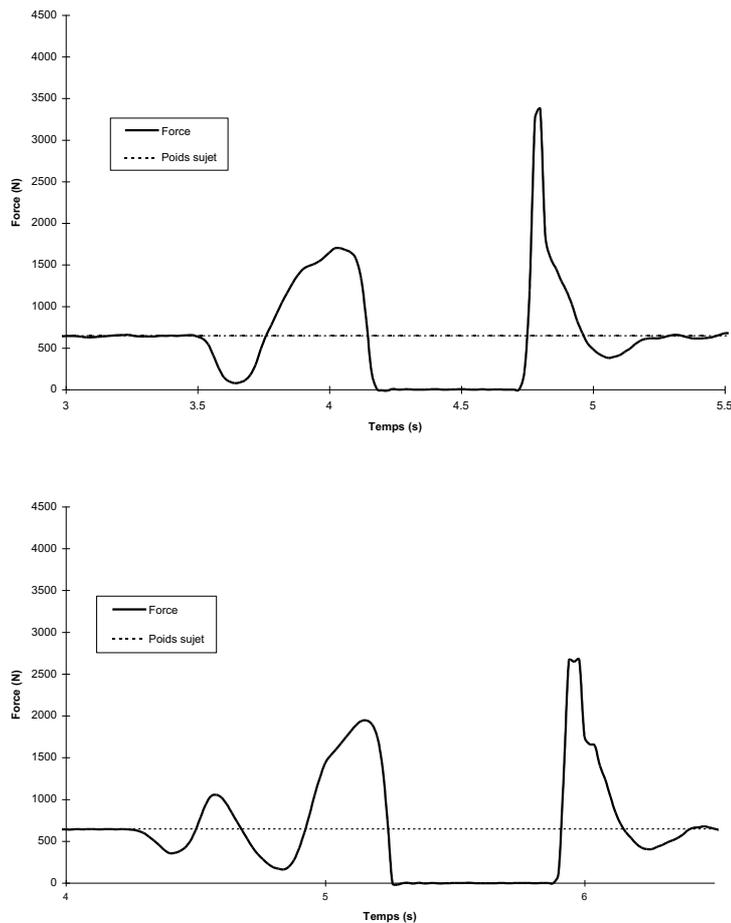


Figure 73. Trois modalités de sauts. 1a. Le Squatting Jump “SJ” : saut effectué depuis une position statique fléchié ; 1b. Le Counter-movement Jump “CMJ” : saut accompli après une rapide flexion - extension des membres inférieurs ; 1c. Le Counter-Movement Jump arm “CMJa” : saut identique au CMJ, mais avec la participation active des bras.

4) Présentation cinématique et dynamique de la performance à l’arraché

Introduction. De nombreuses études analytiques cinétiques, cinématiques (Sato et coll., 2012)⁴⁸² et dynamiques (Lauder et Lake, 2008)⁴⁸³ montrent que la performance en haltérophilie n'est pas uniquement influencée par la force pure, mais aussi par de nombreuses variables de vitesse et de haute technicité qui dans le détail contribuent à l’accomplissement de la performance (Figures 74 et 75). Cependant, le principal facteur qui détermine l’efficacité est la capacité à produire lors du tirage, une puissance de pic très élevée (Fz1 et Fz3) de manière à soulever la barre le plus haut possible (Hbt max) afin de faciliter la posture de réception, de

⁴⁸² Sato K., Sands WA., Stone MH. The reliability of accelerometry to measure weightlifting performance. *Sports biomechanics*, 2012, 11(4): 524-531.

⁴⁸³ Lauder MA., Lake JP. Biomechanical comparison of unilateral and bilateral power snatch lifts. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(3): 653-660.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

fixation pour très rapidement remonter. La coordination segmentaire, notamment lors du franchissement des genoux (zone Fz2) pendant le contrôle de la fixation du dos, l'enchaînement de la triple extension des genoux, des hanches et des chevilles. Toutes ces actions doivent s'accorder pour générer la plus grande vitesse ascensionnelle à la barre ($V_{bt\ max}$) en contrôlant et optimisant sa trajectoire sinusoïdale afin de minimiser les courbes et donc les leviers résistants (a et b). Les objectifs de cette étude étaient de déterminer les variables qui contribuent à la hauteur maximale de la barre en fin de tirage ($H_{dt\ max}$), mais aussi d'apprécier leur modification selon le pourcentage de charge maximale afin de localiser des seuils ou des zones de ruptures techniques pour optimiser l'entraînement et prédire les performances en compétition.

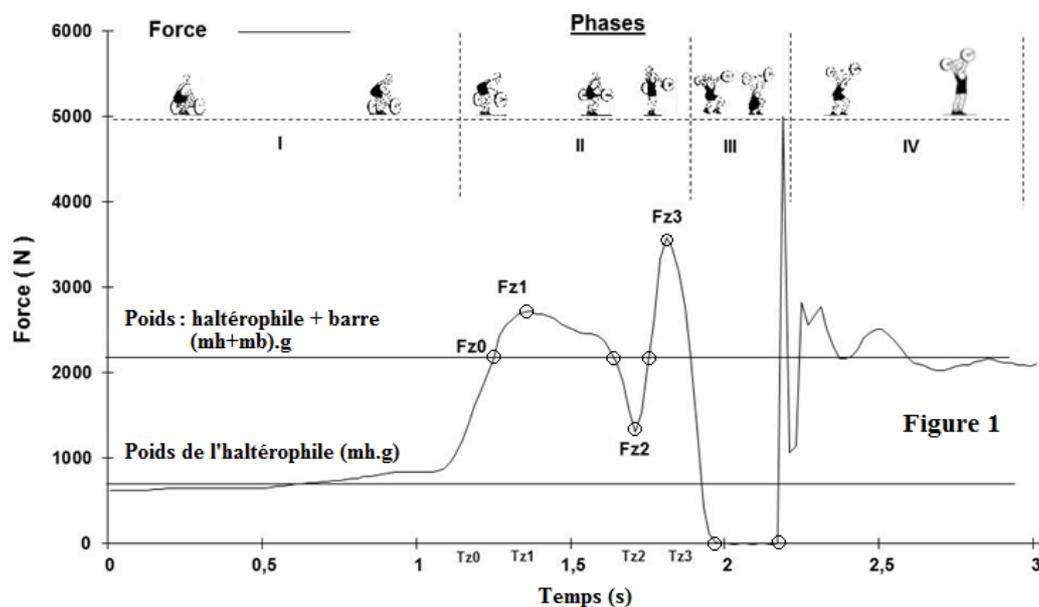


Figure 74. Résultante de force verticale F_z exercée par un haltérophile, lors de l'arraché. 4 phases typiques : (I) la période préparatoire ; (II) le tirage ; (III) le passage sous la barre ; (IV) la stabilisation et le redressement. 2 lignes indiquent : le poids de l'haltérophile, celui du poids de l'haltérophile avec sa barre. F_{z0} signale le décollage de la barre, F_{z1} et F_{z3} révèlent les 2 pics de forces, séparés par la régression F_{z2} lors des transitions posturales dans l'enchaînement technique.

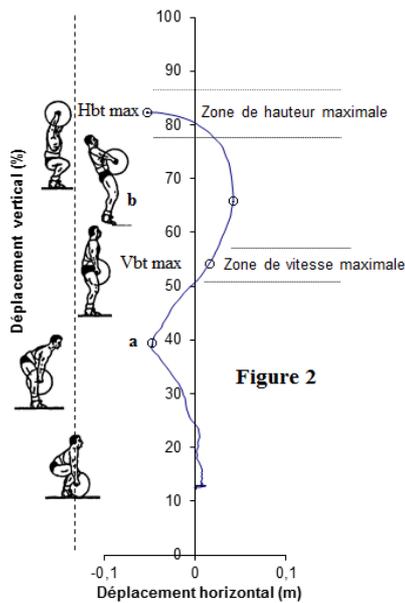


Figure 75. Trajectographie antéro-postérieure (m) et verticale (% de la hauteur de la barre en fin d'arraché) spécifique lors du tirage. Plusieurs points et zones sont déterminants concernant la localisation de la vitesse maximale (Vbt max), mais aussi la hauteur maximale en fin de tirage (Hbt max) de la barre. Les points (a) et (b) indiquent les déviations antérieures et postérieures les plus élevées lors du tracé sinusoïdal souhaitable de la charge.

Méthode. 9 haltérophiles (âge : $24,1 \pm 5,5$ ans ; taille : $1,71 \pm 0,10$ m ; masse : $76,2 \pm 15,2$ kg ; indice de performance en haltérophilie $1,30 \pm 0,19$) parmi les meilleurs nationaux français ont réalisé sur plate-forme de forces 3 essais à l'arraché à 70%, 80% et 90% de leur performance maximale. Les variables cinématiques de la trajectoire de la barre sont enregistrées par un système tridimensionnel optoélectronique (Vicon Mx System). Des points spécifiques localisés sur la résultante de la composante de force verticale Fz (Fz0, Fz1, Fz2, Fz3) et sur la trajectoire verticale et antéro-postérieure de barre (Vbt max et Hbt max) servent d'éléments de comparaison. Ces sportifs sont filmés lors d'une compétition et les images analysées avec le logiciel Dartfish. Pour toutes les variables, les moyennes et les écarts types sont calculés. Ces variables sont comparées en utilisant les tests non paramétriques de Wilcoxon afin de localiser les différences significatives et de Spearman pour caractériser les corrélations.

Résultats. Lors de la compétition, pour des masses soulevées maximales de $1,69 \pm 0,20$ fois la masse corporelle des haltérophiles, la durée du mouvement du décollage de la charge jusqu'à son élévation maximale (Hb max = $1,80 \pm 0,14$ m) bras et jambes tendus est de $3,00 \pm 0,64$ s. Le tirage, du début à sa hauteur maximale (Hbt max = $1,25 \pm 0,09$ m) dure $0,92 \pm 0,08$ s, soit 31,6% du mouvement pour une vitesse moyenne de $1,37 \pm 0,08$ m.s⁻¹ et de pic maximal de $1,82 \pm 0,19$ m.s⁻¹ atteinte en $0,61 \pm 0,15$ s. La quantité de mouvement accumulée depuis la hauteur $0,92 \pm 0,18$ m à Vbt max permet à la barre de s'élever encore de $0,30 \pm 0,06$ m jusqu'à sa position maximale en fin de tirage. Lors des tests de 70% à 90% on constate que les haltérophiles

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

dégagent en moyenne un premier pic de force $Fz1$ supérieur de 1,60 fois le poids de la barre $Fz0$ et un deuxième maximum $Fz3$ de $1,89 \cdot Fz0$, en sachant que l'augmentation de 20% de la charge entraîne une baisse de 6,6% de $Fz1$ ($p < 0,01$) et de 3,1% pour $Fz3$ ($p < 0,01$). On assiste aussi à une baisse de Hbt max de $13,2 \pm 4,3$ cm (8,9%), de la vitesse moyenne de la barre de 10% (Vbt moy $_{90} = 0,98$ m.s $^{-1}$), du pic de vitesse maximale de 13,88% (Vbt max $_{90} = 2,17$ m.s $^{-1}$) pour une durée de tirage identique de 0,92 s. Sur le plan temporel la masse réduit principalement la durée entre le décollage de la barre et le premier pic de force $Fz1$ de 20% pour passer de 0,30 s à 0,24 s ($p < 0,01$), comme $Tz3$ diminue peu, l'écart croissant de 10,87% entre $Tz1$ et $Tz3$ passant de 0,46 à 0,51 s ($p < 0,05$), caractérise l'effet de la masse sur l'exécution technique et ses perspectives.

Discussion. L'étude décrit les phases essentielles qui constituent le tirage pour réussir l'arraché, mais aussi leurs transformations selon l'augmentation de la charge. Elle confirme par le descriptif des variables cinématiques et dynamiques ce qui représente son essence efficace :

- 1) La barre doit atteindre une hauteur critique (Hbt max) pour permettre à l'haltérophile de passer sous elle et la fixer.
- 2) La quantité de mouvement doit être la plus élevée possible, surtout en fin de tirage, tout en conservant un contrôle moteur précis, particulièrement lors de l'effacement et de l'engagement des genoux (zone $Fz2$).
- 3) On récupère difficilement le ralentissement important de la barre à ce niveau, car lors de cette phase de transition, il y a des changements de positionnement articulaires ainsi que des transferts d'énergie dans les composants musculo-tendineux.
- 4) La vitesse ascendante de la barre en fin de tirage est l'élément fondamental pour maximiser la quantité de mouvement (Vbt max). Sur un plan plus spécifique et fondamental, l'originalité de cette étude biomécanique volontairement analytique et descriptive permet dans une seconde phase depuis la localisation de points critiques de caractériser par matrice et iconographie corrélationnelles des modèles régressifs qui facilitent la visibilité de l'optimisation technique, mais aussi son argumentation.

5) Structures sémiophysiques pour l'optimisation du tirage à l'arraché

Introduction. Le but de ce travail est de quantifier les transformations de la technique d'haltérophiles de niveau international selon l'augmentation de la charge à soulever. L'analyse se centre sur le tirage à l'arraché, c'est-à-dire le mouvement qui procure à la barre sa vitesse et sa hauteur maximale avant que l'haltérophile la réceptionne en position fléchie. L'objectif de l'étude est d'analyser les transitions de phases lors du tirage et notamment la régression de force qui se situe au niveau du passage des genoux. Cette analyse en trois dimensions complète les

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

travaux réalisés dans ce domaine par : Bauman et coll., 1988⁴⁸⁴ ; Enoka, 1988⁴⁸⁵ ; Garhammer 1982⁴⁸⁶. L'étude cinématique et dynamique tridimensionnelle d'un nombre important de facteurs permet d'apprécier les transformations de la technique, notamment les transitions de phases coordinatrices qui se situent lors du tirage. L'augmentation de la masse de la barre révèle et amplifie parfois les variations de certaines variables. Le regroupement de l'ensemble des facteurs étudiés selon des structures géométriques sémiophysiques (Thom, 1977⁴⁸⁷ et 1991⁴⁸⁸) dégage les profils de ces changements.

Méthode. Cinq des meilleurs haltérophiles internationaux français participent à l'étude (âge $25,9 \pm 2,6$ ans, masse corporelle $74,7 \pm 14,8$ kg, taille $172,3 \pm 0,1$ cm). Les sujets effectuent chacun quatre essais à l'arraché en utilisant des charges à 50%, 60%, 70% et 80% de leur performance maximale. Ils réalisent leurs mouvements sur une plate-forme de force qui permet d'enregistrer les variations des forces sur 3 axes (Fx, Fy et Fz). Un système optoélectronique (Elite) localise en 3 dimensions les coordonnées (X, Y, Z) d'un marqueur placé sur la barre.

Résultats. Le test de Wilcoxon montre qu'il existe 18.08% de différence significative pour les 71 variables comparées avec des charges de 50% à 80% max.. Les différences significatives se situent principalement sur l'axe dynamique vertical Fz et l'axe cinématique antéro-postérieur de la barre Y. Les différents points critiques présents sur ces axes (Fz1, Fz2, Fz3 ; Yh1, Yh2, Yh3) caractérisent les coordinations motrices lors du passage de la barre au niveau du genou (Figure 76).

⁴⁸⁴ Baumann W., Gross V., Quade K., Galbierz P., Schwirtz A. The snatch technique of world class weightlifters at the 1985 World Championships. *International Journal of Sports Biomechanics*, 1988, 4: 68-89.

⁴⁸⁵ Enoka RM. Load and skill-related changes in segmental contributions to a weightlifting movement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1988, 20: 178-187.

⁴⁸⁶ Garhammer J. Energy flow during Olympic weight lifting. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1982, 14(5): 353-60.

⁴⁸⁷ Thom R. *Stabilité structurelle et morphogenèse : essai d'une théorie générale des modèles*. Paris : InterEditions, 1977.

⁴⁸⁸ Thom R. *Esquisse d'une sémiophysique*. Paris : InterEditions, 1991.

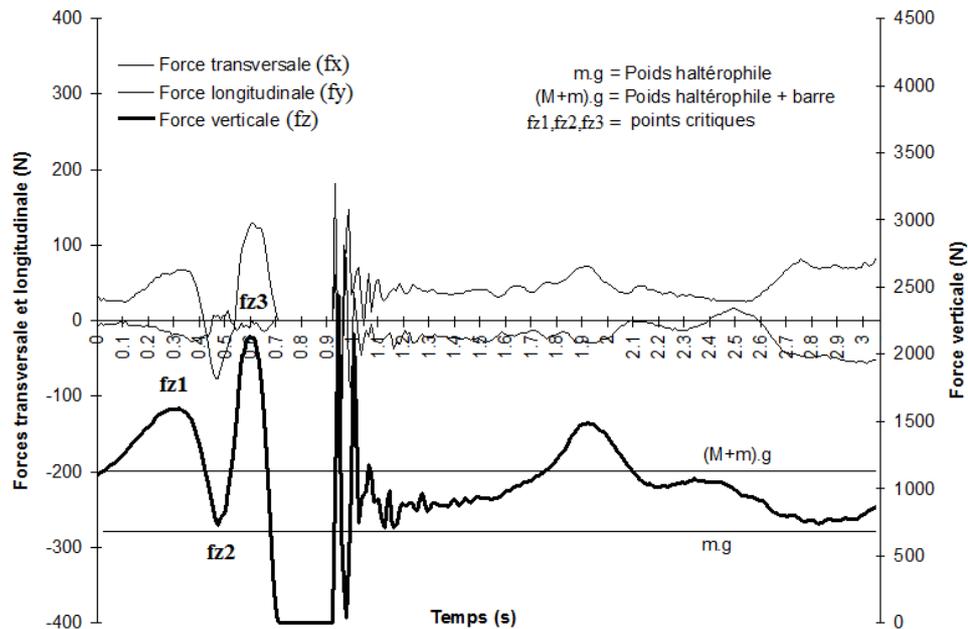


Figure 76. Haltérophile (F). Plateforme de force. Arraché (50% max).

Ces variations cinématiques et dynamiques du système haltérophile-barre et de la barre sur l'axe vertical montrent entre deux maxima de force $Fz1$ et $Fz3$ une zone de diminution de force minimum $Fz2$ (Figure 77). Cette zone critique (surface bouclée) caractérise une transition de phase très importante qui doit être minimale pour une technique optimale. Le calcul de surfaces de ces zones sémiophysiques force-vitesse et la recherche des facteurs biomécaniques corrélés pour les réduire doivent contribuer à améliorer le tirage. La vitesse maximale ($Vz \text{ max.}$) de la barre, indice de référence des entraîneurs est faible ($1.76 \pm 0.14 \text{ m/s}$) par rapport au meilleur niveau mondial. Les différences des hauteurs maximales ($Z \text{ max.}$) de la barre en fin de tirage entre les essais par rapport à la taille des sujets (0.82 ± 0.04) sont révélatrices des seuils critiques et des possibilités des haltérophiles pour des charges maximales (Figure 78). De plus, avant que la barre n'arrive à la hauteur $Z \text{ max.}$, les haltérophiles se trouvent dans une phase de suspension (Susp) qu'il convient de réduire ($0,17 \pm 0.01 \text{ s}$).

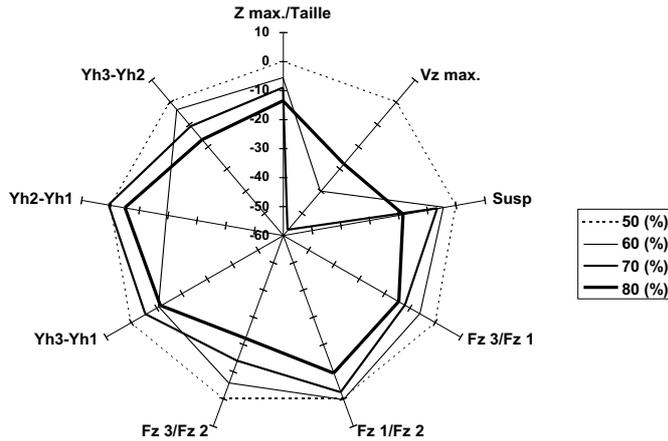


Figure 77. Modifications : de la vitesse maximale de la barre ($Vz \text{ max.}$), de la durée de suspension ($Susp$), de la hauteur maximale ($Z \text{ max./Taille}$) et des rapports de points critiques ($Fz1$, $Fz2$, $Fz3$; $Yh1$, $Yh2$, $Yh3$).

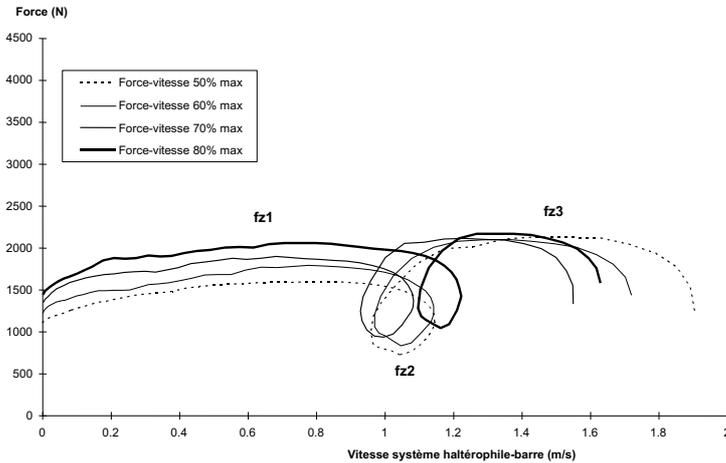


Figure 78. Configuration bouclée représentant les variations de la force et de la vitesse verticale Fz du système haltérophile-barre lors des 4 essais pour un sujet.

Discussion. Les enregistrements de la plate-forme de force (Figure 76) présentent notamment sur l'axe vertical Fz , deux accélérations ($fz1$, $fz3$) séparées d'une décélération ($fz2$) du système haltérophile - barre. Nous savons que chaque fois que Fz est supérieur ou inférieur au poids $(M + m).g$ du système haltérophile (M) - barre (m) l'accélération du système est positive ($fz1$, $fz3$) ou négative ($fz2$). Ces deux pics de force correspondent au premier pic de tirage ($fz1$) de la barre près des genoux et au maximum de force ($fz3$) lors du tirage de la barre au niveau des crêtes iliaques.

Ces deux sommets sont séparés d'un minimum $fz2$ souvent inférieur à $fz0$ (force égale à la somme des poids de l'haltérophile (m_h) et de la barre (m_b)). Ce minimum, révélateur d'une

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

régression de force par rapport au pic $fz1$ et $fz3$ est en relation avec l'efficacité technique de l'haltérophile. En effet sur le plan mécanique la baisse $fz2$ entre les deux pics de forces ($fz1$ et $fz3$) doit être minimisée puisque correspondant à une phase de décélération du système. Cette zone $fz2$ est synonyme d'une perte de puissance due notamment à la coordination motrice lors du passage des genoux et aux transferts de travail entre groupes musculaires différents. La cause la plus probable étant une élévation trop rapide et trop importante du bassin par rapport à la barre. Lors de l'intégration pour obtenir la vitesse du système haltérophile - barre, le point de force $fz2$ détermine une vitesse $vz2$ minimale. Ce ralentissement conséquent de la diminution de force du système est mis en évidence par la surface (puissance) des courbes force-vitesse (figure 77). Ces configurations sémiophysiques (Thom, 1991) caractérisent notamment l'écart de force entre $Fz - fz0$ et leurs surfaces seront d'autant plus grandes que la différence est importante.

Le grand dilemme qui apparaît dans l'interprétation de cette zone de régression de force $fz2$ est celui de faire la part des choses entre les interventions des processus mécaniques et physiologiques, entre l'utile et l'inconvénient de cette régression. En dehors du désavantage de la décélération, cette phase mène à au moins deux développements qui compensent cet handicap apparent. Premièrement, il y a une augmentation de la force développée par les extenseurs des genoux lors de la réutilisation de ce groupe musculaire à un placement optimal de mouvement. En effet, pendant la première partie du tirage, ce sont les quadriceps qui produisent le plus de force. Or, ce n'est qu'une fois les genoux placés en avant par rapport à la barre et après la phase de transition, que toute la force des quadriceps sera à nouveau utilisée. Lors de la première traction, le redressement prématuré des jambes et la position trop horizontale du dos quand la barre atteint la hauteur des genoux, diminue la force des quadriceps. De plus la contribution de force depuis la contraction concentrique des extenseurs de l'articulation des genoux lors de $fz3$ serait augmentée par le transfert d'énergie élastique de la contraction excentrique qui arrive pendant la flexion des genoux. Une technique efficace est caractérisée par le cycle allongement - raccourcissement des groupes musculaires les plus importants. En effet, l'utilisation de l'énergie élastique emmagasinée pendant les phases allongements - raccourcissements sera efficace si la vitesse d'exécution est adaptée. L'optimisation du deuxième tirage à l'arraché dépend principalement de la phase du passage des genoux sous la barre, pour optimiser cette technique, il conviendrait d'ajuster précisément les écarts entre $fz1$, $fz2$ et $fz3$ en analysant les phénomènes mécaniques et physiologiques sous-jacents.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

De plus pour être efficace pendant le tirage, l'haltérophile doit associer aux synergies musculaires et articulaires des principes ergonomiques (serrer la charge). En particulier, pour perdre un minimum d'énergie mécanique, le déplacement du centre d'inertie de la barre doit suivre au plus près celui du centre de gravité de l'athlète pour réduire les leviers et les moments. En effet, les écarts d'intensité de force entre les pics $fz1$ et $fz2$ tout comme les écarts entre $fz2$ et $fz3$, montrent les qualités de l'ajustement technique des haltérophiles lors du passage de la barre au niveau des genoux (effacement et engagement). Avec $fz2$ on assiste à une réduction de l'amplitude du bras de levier résistant qui par suite diminue le moment de torsion musculaire qui doit être fourni par les extenseurs du dos et de la hanche pour une charge donnée. Ainsi, la force maximale des muscles extenseurs du dos et des hanches lors du pic $fz3$ augmente entraînant ainsi une accélération importante de la barre. L'augmentation de la charge de 50% à 80% ne conduit pas à de grandes modifications de la composante de force verticale du système haltérophile - barre, notamment de la structure dynamique du mouvement de tirage. On relève des tendances dont les pourcentages de charge (finalement faible) ne permettent pas d'exprimer totalement, car ce sont des charges que les haltérophiles maîtrisent.

À 80% il y a une meilleure gestion de l'effort étant donné que la tendance des différents rapports de force est à la baisse. On peut dire que la mise en action pour atteindre le premier pic $fz1$ est plus rapide. L'augmentation de la charge traduit une tendance à la diminution des rapports $fz1/fz2$ et $fz3/fz2$. Pour un haltérophile donné, des oscillations importantes entre ces points montrent une mauvaise coordination motrice et notamment d'un franchissement des genoux mal réalisé.

L'efficacité du tirage peut être jugée par l'intermédiaire des données cinématiques de la barre. Les régressions de l'ensemble des variables sur la barre traduisent un phénomène normal étant donné l'augmentation des charges. Sur un plan individuel, le pourcentage de diminution constitue un critère d'efficacité technique et la possibilité de programmer judicieusement l'entraînement par rapport à des points ou zones de rupture. Ces défaillances peuvent se rencontrer sur les variables de hauteurs ($Hb \text{ max.}$, $Hb \text{ max.} / \text{Taille}$ et $Hb \text{ max.} / LJ$) ou de vitesses ($Vb \text{ max.}$ et $Vb \text{ moy.}$). Sachant que ces variables sont fortement corrélées entre elles, mais aussi avec les données obtenues sur le système haltérophile - barre ($fz1/fz0$, $tz3-tz1$ et $tz2-tz1$)

Le tirage constitue la phase essentielle pour réussir l'arraché, il est nécessaire d'envisager ce qui constitue l'essence d'un tirage efficace. La barre doit atteindre une hauteur critique pour permettre à l'haltérophile, de passer sous cette dernière et adapter une position de corps

équilibrée pour la soutenir. Dans le cas de l'arraché, la hauteur de la barre atteinte est plus grande que celle réalisée quand l'haltérophile est en extension complète avec la barre sans vitesse initiale. Cela résulte de la quantité de mouvement, qui doit être la plus élevée possible, notamment en fin de tirage. Mais ceci ne doit pas inciter à tirer le plus fort possible dès le départ si le contrôle moteur (notamment l'effacement et l'engagement des genoux) n'est pas adapté à cette puissance développée, car on récupère difficilement le ralentissement important de la barre à ce niveau. Pendant cette phase de transition, il y a des changements de positionnement articulaires ainsi que des transferts de travail entre groupes musculaires différents (Enoka, 1983⁴⁸⁹ et 1988). Ceci occasionne un ralentissement de la barre au début de cette phase. Or, la vitesse ascendante de la barre en fin de tirage est l'élément fondamental pour maximiser la quantité de mouvement (Ajan, 1988⁴⁹⁰).

Pour optimiser le tirage, toute méthode doit avoir pour but d'augmenter la vitesse finale de la barre en se concentrant sur les positionnements et les vitesses segmentaires. On doit rester particulièrement vigilant au redressement prématuré des jambes pour gagner trop précipitamment de la vitesse et finalement en perdre de manière excessive dans la phase de transition. De plus, par rapport au mouvement de la barre, l'haltérophile doit essayer de conserver les hanches basses pour exploiter au maximum la force et la vitesse des muscles sollicités, notamment les quadriceps.

L'augmentation de la vitesse en fin de tirage permet une élévation de la quantité de mouvement lors du passage en dessous. Un point mort haut plus élevé de la barre facilite, en fonction d'une même vitesse d'exécution du passage sous la barre de l'haltérophile, une meilleure réception spatiale et temporelle. Il faut mettre en pratique tous les moyens nécessaires (placements et synergies articulaires, points d'application des forces optimales) pour augmenter cette vitesse de fin de tirage. Comme le pic de force f_3 est conséquent des phénomènes antérieurs f_{z1} et f_{z2} , cela ne nous semble pas en contradiction avec la nécessité d'optimiser le ralentissement lors du passage des genoux et notamment la surface force - vitesse du système.

Dans la quête d'optimisation des performances humaine et notamment de la force ; le chercheur, l'entraîneur et le sportif entre autres sont sans cesse confrontés à la complexité des systèmes qui y contribuent. La compréhension initiale des conditions de réalisation des

⁴⁸⁹ Enoka RM. Muscular control of a learned movement: the speed control system hypothesis. *Experimental Brain Research*, 1983, 51(1): 135-45.

⁴⁹⁰ Ajan T., Baroga, L. *Weightlifting: Fitness for all Sports*. Budapest: International Weightlifting Federation, 1988.

Partie IV. Chapitre 1. Études sur l'haltérophilie et le saut vertical

performances en haltérophilie se révèle fondamentale pour ensuite appréhender les limites théoriques et pratiques et trouver des solutions de dépassement.

L'haltérophilie est une discipline sportive où l'analyse bio-mécanique, on pourrait dire maintenant l'étude neuro-physiologique - bio-mécanique se révèle essentielle pour comprendre les mécanismes qui participent à la réalisation de performances. En comparant plusieurs niveaux d'haltérophiles, nous remarquons : que les meilleurs haltérophiles élités réalisent généralement la phase de transition (effacement - engagement des genoux lors du passage de la barre, pour maintenir au plus près son centre de masse du centre de gravité du corps de l'haltérophile ; mais aussi l'extension totale du corps) plus rapidement que les autres haltérophiles. Cela peut être vérifié avec des gammes de montées progressives en charge jusqu'à l'impossibilité technique ou l'échec. Une transition plus rapide (double flexion) chez des haltérophiles qualifiés résulte vraisemblablement de la capacité à appliquer une force excentrique à des vitesses plus élevées ou à appliquer une force avec des amplitudes plus importantes (Stone et coll., 2006)⁴⁹¹. Une transition plus rapide (double flexion) chez des haltérophiles qualifiés résulte vraisemblablement de la capacité à appliquer une force excentrique à des vitesses plus élevées ou à appliquer une force avec des amplitudes plus importantes (Stone et coll., 2006).

De plus, les caractéristiques des mouvements dynamiques pendant les différentes phases de levée ont été reliées aux caractéristiques des performances neuromusculaires des haltérophiles. Ce qui explicite tout l'intérêt de la pratique de l'haltérophilie par les sportifs qui cherchent à accroître leur force maximale sans prendre trop de volume musculaire. En effet, les exercices pratiqués en haltérophilie combinent la force et la vitesse à des pourcentages variables, améliorant les possibilités de recrutement des fibres musculaires principalement de type II, favorables à la pratique de sports puissants, brefs très intenses. Le développement des capacités à recruter le plus rapidement un maximum de fibres musculaires permettra au sportif de gagner en vitesse et surtout en force. L'exécution de mouvements maximaux ou supra maximaux favorisera l'activation par le système nerveux des relations intra et inter musculaires indispensables à la réalisation des mouvements intenses.

Finalement les limites en gains de force musculaire seront sensibles aux potentialités d'activation du système nerveux central, à la qualité du système de recrutement et de

⁴⁹¹ Stone MH, Pierce K, Sands WA, Stone ME. Weightlifting: A brief overview. *Strength and Conditioning Journal*, 2006, 28(1): 50-66.

synchronisation des unités motrices et irrémédiablement à l'augmentation de la masse musculaire^{492,493}.

Il convient de souligner qu'avant de commencer la pratique de l'haltérophilie ou du powerlifting, le sportif doit prendre conscience de l'importance de la qualité de ses postures avant, pendant et après l'exécution de tous ses mouvements de musculation. Il faut insister sur la minutie de ses postures en prenant conscience que tout déséquilibre sans charge occasionnera avec d'importantes masses soulevées l'apparition de douleurs suivies avec le temps, d'usures articulaires. Tous les sportifs, d'autant plus ceux qui pratiquent les sports de forces ou de puissances sollicitent leurs corps aux frontières des limites de la résistance corporelle. Ils devraient faire un bilan posturologique et le renouveler chaque année. En effet, tout doit être au mieux, maîtrisé et contrôlé, c'est en cela que des progrès considérables devraient être encore accomplis notamment dans la représentation mentale de son corps lors de l'exécution des mouvements. Une prise de conscience profonde, une intériorisation de la technique par une connaissance approfondie de son corps devrait au-delà de l'aspect performatif éviter de nombreuses blessures.

⁴⁹² Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 1- biological basis of maximal power production. *Sports Medicine*, 2011, 41(1):17-38.

⁴⁹³ Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 2 - training considerations for improving maximal power production. *Sports Medicine*, 2011, 41(2): 125-46.

Chapitre 2. Études de déplacements en mouvements cycliques

1) Le pédalage en BMX (Bicycle Motocross)

Mots clés : *BMX, pédalage, longueur de manivelles, mécanique.*

Le Bicycle Motocross (BMX) est un sport peu connu en France et fait rarement l'objet d'études biomécaniques. Cependant, comme tout sport mécanique, l'ajustement et le choix du matériel sont importants. La position d'un BMXer étant similaire à la position d'un sprinter en cyclisme sur route, la longueur des manivelles du pédalier apparaît de façon évidente comme un facteur d'optimisation de la performance. L'étude se centrera sur ce paramètre. Huit sujets de niveau national et international ont effectué 4 séries de 3 accélérations sur du bitume avec un BMX expérimental permettant des mesures télémétriques (puissance, force, vitesses du pédalier et du vélo). Toutes les données obtenues sont représentées sous forme de figures géométriques qui informent rapidement le pilote. Au niveau de la technique de pédalage, on perçoit alors des différences, par tour de couronne et selon les longueurs de manivelles utilisées.

En cyclisme traditionnel, les analyses biomécaniques pour améliorer la performance se basent sur les potentialités physiologiques du sujet et sur les ajustements mécaniques du matériel selon ses mesures anthropométriques. De nombreuses études ont démontré que le rendement était amélioré par de multiples réglages, influençant la position du cycliste, telles que la hauteur de la selle, l'inclinaison de la tige de selle, la position des pieds sur les pédales, la longueur de manivelles (Hull et Gonzalez, 1988⁴⁹⁴ ; Welbergen et Clijsen, 1990⁴⁹⁵). Cependant, la plupart des protocoles ont été réalisés sur des ergocycles et donnent des résultats ne prenant pas en compte certains paramètres importants de la performance (résistance de l'air, vitesse de course). Les bicyclettes utilisées sont souvent de configurations optimisées pour des disciplines spécifiques. En BMX ou Bicross, le vélo est beaucoup plus petit : les roues ont un diamètre de 20 pouces, la masse est plus importante et la selle ne sert que très peu (les pilotes sont alors debout la plupart du temps). Aucune étude, à notre connaissance, n'a encore été réalisée au sujet des réglages du matériel, alors que la transmission de la puissance musculaire au vélo est primordiale dans la production de la performance. La position d'un BMXer étant

⁴⁹⁴ Hull ML., Gonzalez H. Bivariate optimization of pedalling rate and crank arm length. *Journal of Biomechanics*, 1988, 21: 839-849.

⁴⁹⁵ Welbergen E., Clijsen L. The influence of body position on maximal performance in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 1990, 61: 138-142.

Partie IV. Chapitre 2. Études de déplacements en mouvements cycliques

celle d'un sprinter, l'objet de l'étude sera la longueur des manivelles, car leurs choix s'appuient encore sur des données empiriques ou dépassées.

Matériel et protocole

8 pilotes en BMX, de niveau national et international (3 Élites, 2 Juniors, 3 Seniors) participent volontairement à l'étude (Tableau 2).

	Taille (cm)	Masse (kg)	Entrejambe (cm)	Pointure	Cheville (cm)	Tibia (cm)	Cuisse (cm)	Braquet (rapport)	Manivelles (mm)
1	182	70,2	89,5	43	7	44	46	43/16	180
2	167,5	65	79,5	43	7	40,5	42	43/16	175
3	182	65,2	82,5	43	7	45	44	41/15	180
4	176	75	81	43	7	42	44	43/16	180
5	175,5	77,4	81,5	43,5	7	43	44	43/16	180
6	169	73,8	75,5	41	7	39	41	44/16	180
7	188	94,7	85,7	45	7	41,5	48,5	44/16	180
8	183,5	75,4	87,5	43,5	7	45	47	41/15	180
9	170	57	81,5	42	7	41,5	43	40/15	175

Moyenne	177,1	72,63	82,69	43,00	7	42,4	44,39		
Écart-type	7,243	10,54	4,27447203	1,08972	0	2,04	2,395		

Tableau 2. Caractéristiques anthropométriques et mécaniques des pilotes.

Les sujets ont réalisé 4 séries de 3 accélérations de 20 mètres sur une surface en bitume. Une première série est réalisée avec le vélo personnel, ensuite les trois séries suivantes s'enchaînent, dans un ordre aléatoire avec le BMX expérimental : une série est faite avec des manivelles d'une longueur de 175 mm, une autre avec des manivelles de 180 mm et la dernière avec des manivelles de 182 mm. Des cellules photoélectriques sont placées au début et à la fin du sprint. L'expérimentation s'effectuera sur le BMX expérimental (Figure 1). Ce système de télémessure, élaboré par M. Ruiz et opérationnel depuis le mois de juillet 1999, est un BMX muni de différents capteurs : 2 céléromètres et 2 dynamomètres. Les capteurs de vitesse sont placés au niveau de la roue arrière (vitesse du BMX lors de l'exercice) et au niveau de la couronne du pédalier (vitesse de rotation du pédalier). Les capteurs de force sont situés sur le plateau du pédalier, spécialement conçu pour ce BMX (Figure 2).



Figure 79. Photographie du BMX expérimental

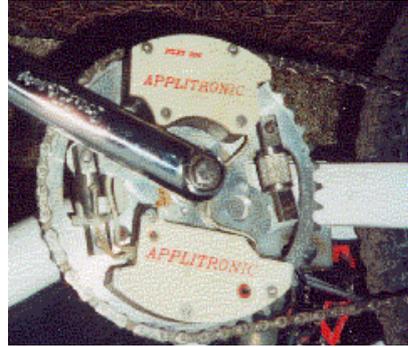


Figure 80. Photographie de la couronne de pédalier munie des capteurs de force.

Résultats. Nous présentons pour l'ensemble des sujets, une configuration géométrique (Figure 82) qui synthétise l'ensemble des résultats (Tableau 3) et des interactions des différentes variables lors des trois changements de manivelles. Il convient d'approfondir et d'exploiter les données dans une logique d'aide au choix optimal des manivelles.

	Fmax (N)	Fmin (N)	Fmoy (N)	Pmax (W)	Pmin (W)	Pmoy (W)	Vpmax (rad/s)	Vpmin (rad/s)	Vpmoy (rad/s)	Vvmax (rad/s)	Vvmin (rad/s)	Vvmoy (rad/s)
175	3182.01	1764.93	2473.47	928.97	351.35	640.16	7.22	4.12	5.67	3.47	1.99	2.73
180	3110.71	1614.61	2362.66	1083.72	542	812.86	6.44	3.33	4.88	4.46	2.58	3.52
182	3192.8	1709.89	2451.34	1162.68	625.29	893.99	6.26	2.84	4.68	4.24	2.03	3.135

Tableau 3. Valeurs moyennes de chacun des paramètres mesurés pour les différents types de manivelles 175, 180, et 182 mm

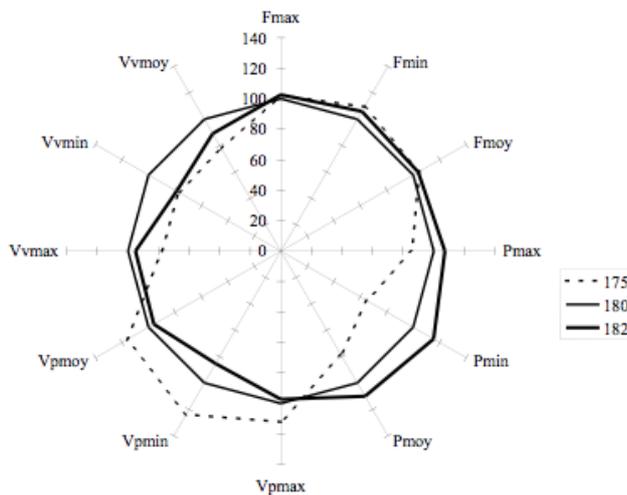


Figure 81. Courbes moyennes des longueurs de manivelles en fonction des paramètres mesurés.

2) Le pédalier PROrace : technologie comportant des manivelles de longueur variable

Mots clefs : Manivelle, pédalier, technique

Introduction. Les nombreuses recherches et innovations technologiques ont contribué à l'amélioration de la performance du cycliste. Malgré tout, il est reconnu que la posture du cycliste et son mouvement de pédalage associé, restent encore à optimiser (Caldwell et coll., 1998)⁴⁹⁶. En effet, pour une même position, l'application des appuis sur les pédales tout au long d'un cycle de pédalage développe depuis les manivelles des forces qui varient considérablement (Kautz et Hull, 1993)⁴⁹⁷. Actuellement, les manivelles classiques sont de longueur fixe. L'objet de cette étude est de décrire et de tester un pédalier à manivelle de longueur variable (PROrace, PCT/FR96/01274). Les forces appliquées sur les pédales sont mesurées par l'intermédiaire de capteurs CTC de manière à comparer le pédalier PROrace par rapport à un pédalier classique traditionnel sur des tests à puissances modérées constantes.

Description du pédalier PROrace. Ce pédalier pour bicyclette est composé de manivelles extensibles lors d'un mouvement de rotation du plateau (Figure 1). Les manivelles du pédalier comportent chacune une partie fixe et une partie mobile. Le bras fixe est maintenu à une extrémité d'un arbre d'entraînement du plateau mobile en rotation selon un axe horizontal. Le bras mobile qui reçoit une pédale montée libre en rotation est en translation radiale par rapport à la partie fixe. Les manivelles, suivant leur position, peuvent s'allonger ou se raccourcir de 25 mm, tout en maintenant un mouvement de pédalage circulaire. Il est évident que l'objectif majeur de ce pédalier PROrace consiste à produire une puissance plus élevée pour un moindre effort sur les pédales. Ce pédalier testé au laboratoire de mécanique et de métrologie à l'École des Mines d'Alès fait apparaître un gain en couple, travail et puissance par rapport à un pédalier classique (Figure 1).

⁴⁹⁶ Caldwell GE., Li L., McCole SD., Hagberg JM. Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling. *Journal of Applied Biomechanics*, 1998,14(3): 245-259.

⁴⁹⁷ Kautz SA., Hull ML. A theoretical basis for interpreting the force applied to the pedal in cycling. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(2): 155-65.

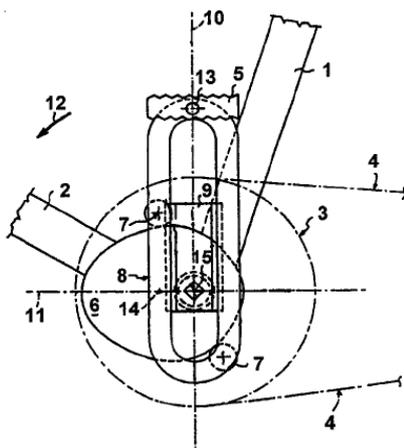


Figure 82. Vue latérale du Pédalier PROrace (Pédalier à Rendement Optimisé. Brevet : PCT/FR96/01274). (1) tube de selle, (2) élément tubulaire oblique du cycle, (3) plateau, (4) chaîne, (5) pédale, (6) came, (7) galets, (8) partie extérieure mobile de la manivelle, (9) partie intérieure de la manivelle, (10) axe vertical « radial » à la manivelle, (11) axe longitudinal horizontal, (12) sens de rotation, (13) axe de rotation de la pédale, (14) centre du périmètre de rotation, (15) axe du pédalier.

Matériel et méthode. Huit sujets sportifs (âge : $27,3 \pm 5,5$ années, taille : $1,77 \pm 0,1$ m et masse : $69,2 \pm 4,2$ kg) ont effectué des tests à puissance constante (sur cyclosimulateur) avec un même vélo équipé du pédalier PROrace puis d'un pédalier classique. Quatre sujets ont commencé l'expérimentation avec le pédalier PROrace et quatre autres avec un pédalier classique. Les pédaliers ont ensuite été intervertis. Des capteurs de force CTC (Captels Pesage, France) étaient placés entre les chaussures et les pédales, les signaux étaient enregistrés et traités depuis une carte d'acquisition. Chaque sujet montait sur le vélo fixé sur le cyclosimulateur, ses caractéristiques anthropométriques et son positionnement étaient notés. Les informations de puissance et de vitesse du cyclosimulateur (Cateye Cyclosimulateur CS-100), celle de vitesse pour vérification (CateyeMity2, cyclocomputer, Model CC-MT200), la fréquence de pédalage (Sigma Sport BC 1200) et les données d'un cardiofréquencemètre (Plar) étaient enregistrées sur caméscope (Toshiba) et présentées sur écran vidéo aux sujets qui réalisaient leur expérimentation. Ils pouvaient contrôler leur effort. Les sujets ont réalisé 12 essais, 3 essais avec le braquet 52/19 et 3 essais en 52/15 respectivement avec les deux pédaliers. Ils devaient se stabiliser au seuil de puissance (250 W) avec 4 % de pente. Les acquisitions des forces (8 s à la fréquence de 100 Hz) étaient effectuées quand le sujet se stabilisait à la puissance souhaitée. La durée des efforts avec chaque pédalier (entre 5 et 7 minutes) dépendait de l'habileté du sujet à se stabiliser à 250 W.

Résultats et Discussion. De manière générale les forces exercées sur les pédales sont différentes ($p < 0,001$) pour les deux pédaliers à la même puissance, notamment à 250 W avec 4

% de pente. Les sujets exercent une force de 10,5 % moindre sur le pédalier PROrace qu'avec un pédalier à longueur de manivelle constante. Les morphologies typiques des courbes de forces enregistrées révèlent cette différence (Exemple pour un sujet Figures 2a et 2b). Il faut noter que ces résultats fluctuent selon les différentes modalités de pédalage des sujets.

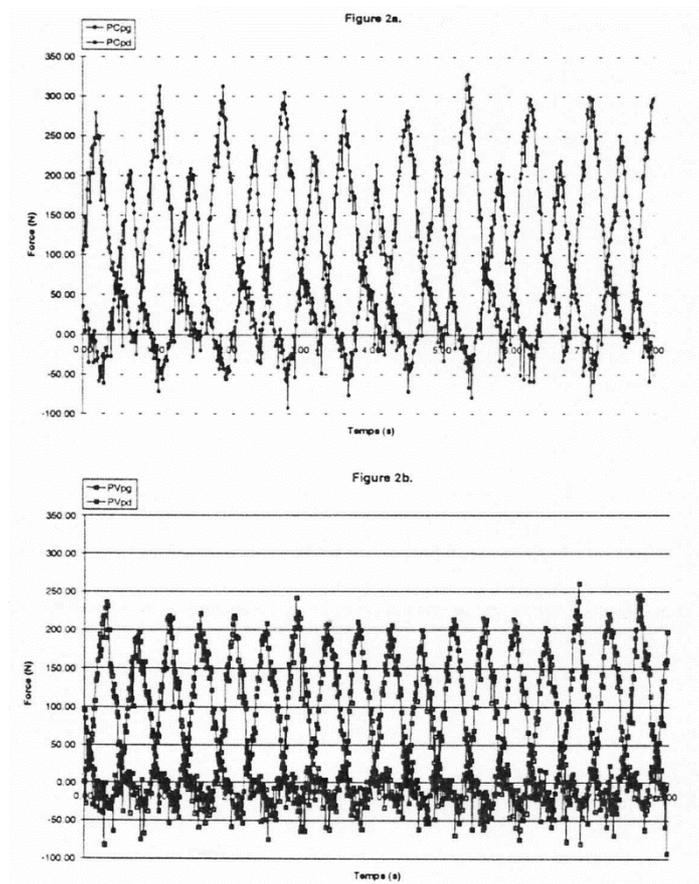


Figure 83. Forces exercées sur les pédales, droite “pd” et gauche “pg” avec un pédalier à manivelles de longueur constante “PC” (figure 2a) et un pédalier à manivelles de longueur variable “PV” (figure 2b) pour le sujet “S” (250 W, 4%, 8s, 52/19).

Le gain de force provient principalement du décalage vers l’avant d’un axe fictif qui augmente le bras de levier de 25 mm vers l’avant et le réduit dans la même proportion vers l’arrière de l’axe de rotation. C’est quand la force motrice est à son maximum que le bras de levier que constitue la longueur de la manivelle est maximum. Le couple moteur plus important génère une force propulsive plus élevée vers l’avant de l’axe de rotation. Le retour de la pédale est plus rapide pendant le trajet du point mort bas jusqu’au point mort haut. Il faut noter que ces résultats fluctuent en fonction des différentes modalités de pédalage des sujets. Il convient de poursuivre l’analyse détaillée des résultats et notamment des cycles de pédalage en se fondant sur la localisation de points singuliers (points spécifiques).

Partie IV. Chapitre 2. Études de déplacements en mouvements cycliques

Ce protocole expérimental se poursuit par un travail d'analyse cinématique en trois dimensions (Système Vicon) ; associé à l'acquisition de variables physiologiques (VO_2 , électrocardiographie, électromyographie), il devrait démontrer très précisément l'intérêt de ce pédalier pour l'optimisation des performances physiques sur un plan énergétique.

3) L'influence de l'inclinaison des roues sur le déplacement en fauteuil roulant

Mots-clefs : fauteuil roulant, carrossage, performance

Dans la perspective d'optimiser les performances sportives en fauteuil roulant, de nombreuses recherches analysent l'influence de l'ajustement du matériel sur de multiples variables physiologiques et biomécaniques. Cependant, seuls Veeger et coll. (1989)⁴⁹⁸ ont étudié le rôle de l'inclinaison latérale des grandes roues sur quelques paramètres cinématiques. L'objectif de notre étude est de mesurer la vitesse de pivot du basketteur en fonction du « carrossage » des roues (9°, 12°, 15°). Un groupe de 8 enfants débutants (Âge 15±2,6 ans, masse 47,6±9 kg, taille 158,6±8,5) et 7 adultes experts (Âge 15±2,6 an, masse 47,6±9 kg, taille 158,6±8,5) participent à cette étude. Les sujets effectuent trois-huit en continu entre deux plots écartés de 3m. Deux paires de cellules photo-électriques nous permettent de mesurer le temps mis pour effectuer le parcours. Les tests statistiques non paramétriques montrent ($P<0,05$) selon le degré d'inclinaison des roues des résultats significatifs pour les phases de pivots, mais non pour les phases de sprints. Nous pouvons en conclure qu'un fauteuil avec un carrossage à 15° permet d'améliorer la vitesse de pivot du basketteur.

Les progrès techniques dans le domaine de l'handisport sont tels, que le fauteuil roulant s'est spécialisé pour répondre aux exigences et aux spécificités des différentes disciplines sportives. Ainsi, la connaissance précise des caractéristiques du couple homme-fauteuil dans la pratique du basket-ball a permis de réaliser des fauteuils roulants sur mesure en fonction du handicap et de l'activité. De nombreuses recherches physiologiques et biomécaniques sont effectuées avec pour objectif d'améliorer la performance sportive par un réglage optimal du matériel. Poulain, Bernard, Vinet, Bouges (1997)⁴⁹⁹ ou encore Bernard (1994)⁵⁰⁰ ont analysé et

⁴⁹⁸ Veeger D., Van Der Woude L., Rozendal R. The effect of rear wheel camber, manual wheelchair propulsion. *Journal of Rehabilitation Research & Development (JRRD)*, 1989, 26: 37-46.

⁴⁹⁹ Poulain M., Bernard P., Vinet A., Bouges S. *Recherche du réglage optimal en vue de la performance sportive*. In : Simon L., Pélissier J., Hérisson C. Le fauteuil roulant. Paris : Masson, 1997, 310-317.

⁵⁰⁰ Bernard P. Ergonomie du déplacement en fauteuil roulant chez le traumatisé médullaire. *STAPS*, 1994, 35: 77-92.

synthétisé, selon différentes rubriques l'ensemble de ces recherches. Dans cette littérature spécifique, seuls Veeger, Van Der Woude et Rozendal (1989)⁵⁰¹ ont étudié l'influence de l'inclinaison latérale des grandes roues de 0° à 9° sur les réponses cardio-respiratoires et sur quelques paramètres cinématiques. Cependant il semblerait qu'aucun travail ne réponde de manière justifiée et précise à l'incidence de l'inclinaison des roues sur le jeu du basketteur en fauteuil roulant. L'objectif de notre étude est de mesurer la vitesse de pivot du basketteur en fonction du carrossage des roues (9°, 12°, 15°). Les résultats devraient aboutir à des choix optimisés d'utilisation de fauteuils roulants pour ce type de sport collectif.

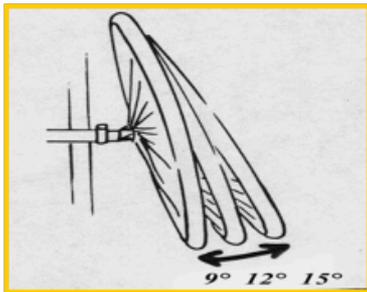


Figure 84. Trois degrés d'inclinaison des roues d'un fauteuil roulant.

Méthode et Protocole. Un premier groupe constitué de 8 enfants débutants dans cette activité et un second de 7 adultes experts évoluant en championnat de nationale I B participent à cette étude. Les sujets effectuent trois-huit en continu entre deux plots écartés de 3 m. Ces tests sont réalisés trois fois de manière aléatoire pour éviter les effets d'ordre. Trois fauteuils roulants sont réglés avec les degrés d'inclinaison respectifs variant de 9°, 12° à 15°. Les autres paramètres de réglage sont identiques. Deux paires de cellules photo-électriques espacées de 2 mètres et placées devant les plots, permettent de mesurer le temps total mis pour effectuer le parcours. Ce temps sera décomposé en deux parties : la phase de sprint entre les deux plots et la phase réelle de pivot autour du plot.

⁵⁰¹ op. cit.

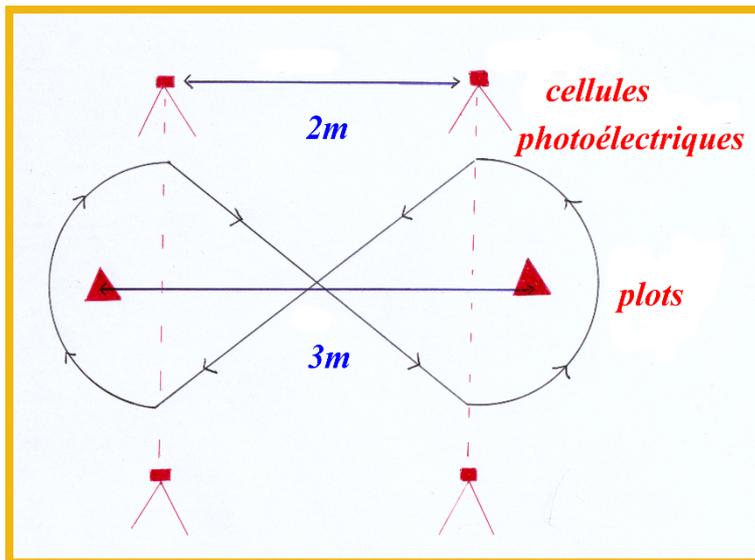


Figure 85. Parcours à réaliser en fauteuil roulant, avec des roues aux degrés d'inclinaison, variant de 9°, 12°, 15°.

Résultats et discussions. Nous avons comparé les performances réalisées avec les trois fauteuils d'inclinaisons respectives à 9°, 12°, 15°. Le traitement statistique de type non paramétrique (test de Wilcoxon) avec un seuil de signification fixé à $P < 0,05$ donne des résultats significatifs pour les temps totaux (sprint + pivot) des enfants et des adultes. De plus, nous obtenons des différences significatives pour les phases de pivots, mais non pour les phases de sprints.

Nous pouvons en conclure qu'un fauteuil avec un carrossage à 15° permet d'améliorer la vitesse de pivot du basketteur. Cependant, il ne faut pas oublier de prendre en compte dans l'analyse des résultats l'influence du handicap, du niveau de jeu et de la place du joueur sur le terrain. En ce qui concerne la vitesse linéaire lors des phases de pivots, une analyse plus fine nous semble nécessaire. C'est pourquoi, une deuxième étude en cours se propose d'évaluer l'incidence de l'inclinaison des roues sur la vitesse et l'accélération lors d'un sprint par l'intermédiaire d'un capteur de vitesse.

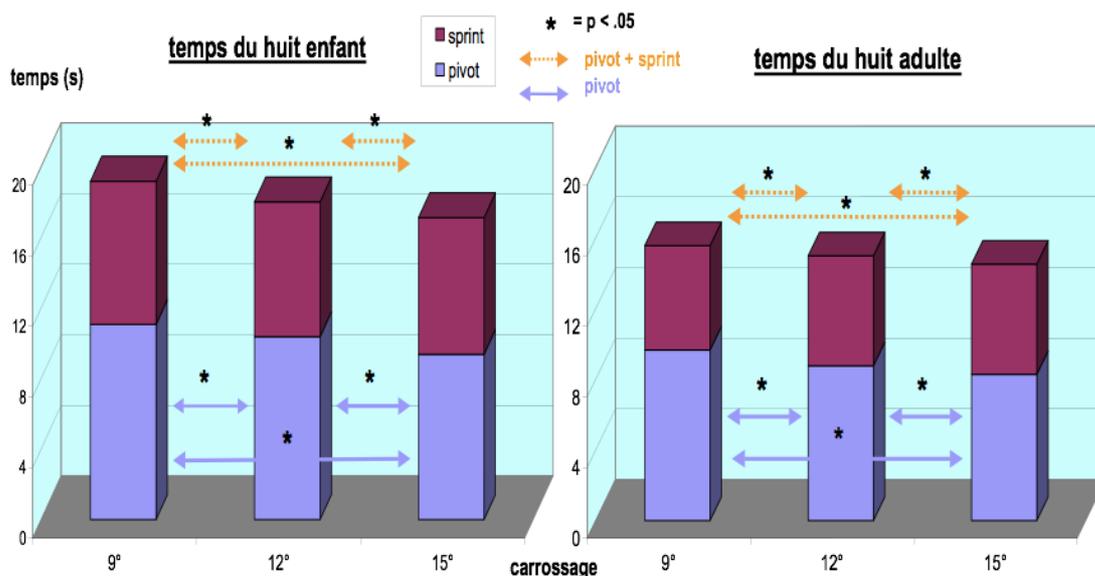


Figure 86. Graphiques représentant les performances réalisées sur le parcours selon les deux groupes de sujets et en fonction des degrés d'inclinaison des roues 9°, 12° ou 15°.

Perspectives et limites. Ce test réalisé avec peu de matériel (principalement des cellules photo-électriques, des plots et au minimum un fauteuil) est simple. Cependant, il permet de différencier l'effet de l'inclinaison des roues sur la propulsion linéaire et en virage. Il est bref, intense, mais aussi ludique pour des sportifs aux handicaps multiples. On peut complexifier le parcours pour faciliter en fonction des performances réalisées le choix spécifique d'un fauteuil selon le handicap du sujet. Cette expérimentation devrait se poursuivre sur des sujets équipés de marqueurs articulaires pour une étude descriptive cinématique 3D de la propulsion. À l'origine, le projet d'achat concrétisé de deux capteurs de forces pour mesurer les forces au niveau de l'assise et du dos devait permettre l'analyse dynamique aussi. Comme le projet ne s'est pas réalisé, j'ai transformé leur utilisation pour des tests posturologiques orthostatiques verticaux. C'est toute une série d'études qu'un étudiant inscrit en master ou en doctorat pourrait réaliser avec initialement un cardio fréquence mètre / GPS, un simple caméscope et des cellules photo-électriques, un financement régional et/ou une bourse Cifre pourrait facilement être envisagée. Les principales limites concernent l'effet de la masse de l'équipement technologique de mesure, mais surtout l'autorisation d'expérimentation, même s'il s'agissait de tests posturologiques statiques.

4) Évaluation de la résistance au déplacement du fauteuil roulant sur ergomètre instrumenté

Mots clefs : ergomètre, fauteuil, propulsion

Introduction. La résistance totale au déplacement en fauteuil roulant (F) est l'un des facteurs pertinents à évaluer pour améliorer l'efficacité propulsive du système sujet - fauteuil. L'objectif de cette étude est de mesurer la variation de vitesse du fauteuil roulant au cours de la phase de décélération avec un ergomètre instrumenté (Devillard et coll., 2001)⁵⁰². Cette variation calculée en fonction de trois carrossages (9°, 12° et 15°), utilisés majoritairement dans le championnat handibasket et selon deux positions différentes du sujet, spécifiques à la propulsion du fauteuil roulant.

Matériel et méthode. Pour évaluer F, un groupe constitué de douze hommes valides (âge 27,0±6,7 ans ; masse 72,1±6,7 kg ; taille 175,1±4,5 cm) a participé à l'étude. Le sujet, une fois installé dans son fauteuil roulant, fixé à l'ergomètre, réalise trois poussées sur les mains courantes puis garde la même position déterminée à l'avance (a puis b) jusqu'à l'arrêt complet des roues du fauteuil roulant. Il effectue l'opération pour les trois inclinaisons différentes (9°, 12°, 15°), et ceci, dans les deux positions suivantes : a) adossé au fauteuil, les mains sur les cuisses, b) tronc penché en avant, les mains posées sur les cale-pieds. Les tests sont réalisés de manière aléatoire pour éviter les effets d'ordre. Un nouveau modèle d'ergomètre pour fauteuil roulant (VP 100 Handi, HEF Tecmachine) est utilisé pour mesurer précisément F (Figure 1). La résistance totale au déplacement en fauteuil roulant (F en Newton) a pu être calculé grâce à l'équation suivante : $F = M \cdot a$ avec M = masse sujet + masse fauteuil (kg) et a = décélération ($m \cdot s^{-2}$).

⁵⁰² Devillard X., Calmels P., Sauvignet B., Belli A., Denis C. Validation of a new ergometer adapted to all types of manual wheelchair. *European Journal of Applied Physiology*, 2001, 85: 479-485.

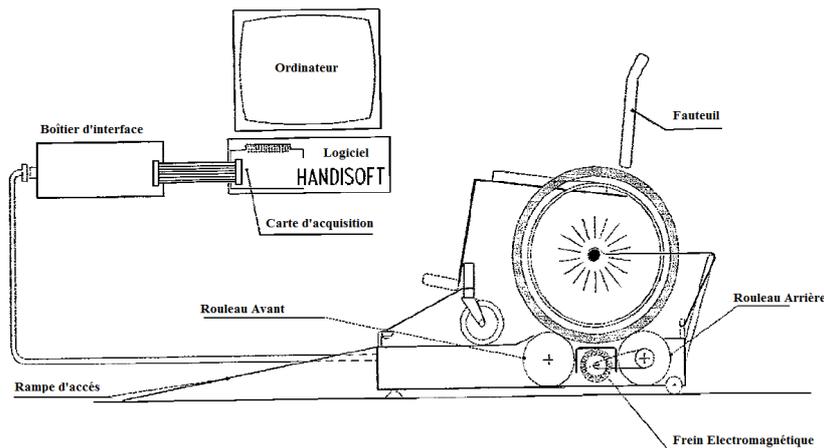


Figure 87. Chaîne d'acquisition, fauteuil roulant fixé à l'ergomètre. Cet ergomètre est constitué d'un système de rouleaux, entraîné par les roues du fauteuil. Le réglage angulaire des deux ensembles de rouleaux, permet de garder un bon rendement de roulage avec des fauteuils équipés de roues à fort carrossage (réglage angulaire de 0° à 15° par rapport à l'horizontale). Ces deux ensembles de rouleaux peuvent être réglés en fonction du carrossage des roues. Par exemple, lorsque le carrossage est de 12°, les rouleaux de l'ergomètre seront également inclinés à 12° pour obtenir un angle de 90° entre les roues du fauteuil roulant et les rouleaux de l'ergomètre. Il est équipé de deux freins électromagnétiques, montés en balance sur un capteur de force qui permet d'imposer au fauteuil un couple de freinage de 0 Nm à 4 Nm. Deux capteurs de vitesse instantanée par codeurs incrémentaux (3600 pts par tour de rouleau) complètent l'équipement de mesure. Les signaux de vitesse et de force ont été échantillonnés à 100 Hz et enregistrés sur ordinateur grâce à une carte d'acquisition. Ces fréquences d'échantillonnage élevées permettent des analyses au sein même du cycle de propulsion. L'étalonnage a été effectué par les constructeurs.

Résultats. Nous obtenons, pendant la phase de décélération, une équation de régression de type $y = a.x + b$ avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,99 et ce pour tous les tests. Les moyennes et les écarts-types de tous les paramètres sont calculés pour chaque situation expérimentale (tableau 1). Un traitement statistique de type non paramétrique (test de Wilcoxon) avec un seuil de signification fixé à $P < 0,05$ a été appliqué aux résultats obtenus. On observe des différences significatives $P < 0,01$ lorsque l'on compare F en fonction des 3 carrossages et des 2 positions du sujet.

	9°	12°	15°
Position a	28,4±5,6 (**)	38,6±7,0 (**)	53,2±7,3 (**)
Position b	20,7±4,4 (**)	26,4±5,4 (**)	36,9±7,6 (**)

Tableau 4. Moyennes et écarts-types de la résistance au déplacement (en Newton) en fonction du carrossage (9°, 12°, 15°), et des positions a et b du sujet. (**) Indique une différence significative $P < 0,01$

Discussion et conclusion. Les résistances à l'avancement sont déterminées par la position du sujet dans son fauteuil et par le carrossage du fauteuil roulant. En effet, F est supérieur dans la position a par rapport à la position b. Ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque le sujet est penché le tronc en avant, il y a un allègement de la masse sur les grandes roues du fauteuil roulant. Lors d'un cycle de propulsion, il faut donc tenir compte de la variation

Partie IV. Chapitre 2. Études de déplacements en mouvements cycliques

de la position du tronc pour évaluer F . D'autre part, on observe une augmentation de F proportionnelle à l'augmentation du carrossage (9° , 12° , 15°). Cela tendrait à confirmer l'hypothèse selon laquelle l'augmentation du carrossage limiterait la vitesse de propulsion linéaire du fauteuil roulant.

Chapitre 3. Approches des postures et des équilibres

1) L'Appui Tendu Renversé (ATR) en gymnastique

Mots clefs : ATR, gymnastique, vision

Introduction. Les différentes parties du corps sont organisées entre elles dans des positions qui déterminent une attitude d'ensemble, la posture (Bouisset, 1991)⁵⁰³. À chaque posture correspond un état d'équilibre. Celui-ci ne peut se faire sans la prise en compte d'afférences sensorielles multiples d'origines labyrinthiques, proprioceptives et visuelles (Gahéry, 1993)⁵⁰⁴. L'étude de figures acrobatiques maîtrisées techniquement offre des situations standardisées, reproductibles et nécessitant des contrôles fins et continus, ainsi elles permettent de mettre plus en évidence la contribution spécifique des différentes informations sensorielles pour le contrôle postural (Pozzo et coll., 1988)⁵⁰⁵. L'étude est centrée sur un élément gymnique présentant des caractéristiques originales par rapport à la posture orthostatique, c'est-à-dire l'appui tendu renversé. Depuis les données cinématiques et dynamiques tridimensionnelles recueillies, l'influence de l'appareil visuel sur l'équilibre des gymnastes est analysée.

Méthode et protocole. Quatre gymnastes (âge $22,5 \pm 2,5$ années ; masse 61 ± 3 kg et taille $171 \pm 6,5$ cm) de niveau régional ont participé à cette étude. Les sujets debout, les pieds légèrement écartés et parallèles, devaient s'établir à l'ATR et le maintenir, au minimum deux secondes (Figure 1). Après une période d'échauffement individuel et de prise de marque, les gymnastes ont réalisé cinq ATR yeux ouverts (YO) puis dix yeux fermés (YF) et enfin cinq autres équilibres YO. Le temps de récupération entre les essais était libre pour chaque sujet. Les données cinématiques sont acquises en positionnant vingt marqueurs rétro réflexifs sur différents points du sujet pour ensuite être pris en compte par le système de vidéo métrie tridimensionnelle (VICON 370, fréquence d'acquisition : 50 hz). L'acquisition des forces s'effectue par l'intermédiaire de deux plates-formes forces (AMTI, fréquence 250 hz) placées sous chacune des deux mains (Figure 1).

⁵⁰³ Bouisset S. Relation entre support postural et mouvement intentionnel : approche biomécanique. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique*, 1991, 99, A77-A92.

⁵⁰⁴ Gahéry Y. Équilibre et maintien de la posture. *Motricité cérébrale*, 1993, 14 : 89-104.

⁵⁰⁵ Pozzo TH., Clément G., Berthoz A. Étude du contrôle moteur de l'appui tendu renversé sur les mains. *Agressologie*, 1988, 29(9) : 649-651.

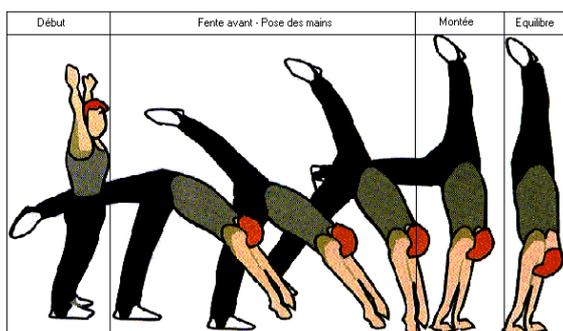


Tableau 5. Phases de l'équilibre. Début ; Fente avant - Pose des mains ; Montée ; Equilibre. [avec Position de départ (Pd) ; Mains sur plates-formes de force (T0) ; Début d'équilibre (Tde) ; Fin d'équilibre (Tfe)].

Résultats et discussion. Sur un plan descriptif et global (Tableau 1) on constate que les durées (T0-Pd, Tde-Tdf, Pd-Tfe) présentent des différences significatives au test non paramétrique de Wilcoxon, ce qui n'est pas le cas pour les structures temporelles motrices de mise à l'équilibre YO₁ et YO₂. Par rapport à un plan horizontal et à l'équilibre, les résultats des calculs des surfaces de projection du centre de pression ($S = (-My/Fz \times Mx/Fz)$) sur les deux plates-formes de force (main droite, main gauche) sont différents au seuil de 5% selon le mode d'exécution YO ou YF. L'évolution de la résultante des forces (Fx, Fy, Fz) ne présente pas de différence significative entre les deux mains et les trois conditions de réalisation (YO₁, YF et YO₂), seuls les moments résultants fluctuent. Le regroupement des variables cinématiques et dynamiques sur un même graphique, selon des échelles étalonnées en pourcentage de fluctuations, montre la gestion de l'équilibre par les gymnastes.

Durées des différentes phases (en secondes)	YO ₁	YF	YO ₂
Position de départ (Pd) - Mains sur plates-formes de force (T0)	2,02±0,58	2,01±0,59	2,16±1,11
Mains sur plates-formes de force (T0) - Début d'équilibre (Tde)	1,53±0,65	1,67±0,70	1,36±0,25
Début d'équilibre (Tde) - Fin d'équilibre (Tfe)	4,38±2,21	3,72±1,73	4,45±1,86
Position de départ (Pd) - Fin d'équilibre (Tfe)	5,99±2,46	5,52±2,22	5,80±1,86

Tableau 6. Différentes phases lors de l'exécution des ATR yeux ouverts (YO₁ et YO₂) et yeux fermés (YF).

Perspectives et limites. L'étudiant François Asseman, que je n'ai pu encadrer sur Lille a poursuivi ce travail à l'université de Toulon avec le professeur Jacques Cremieux pour soutenir sa thèse intitulée : « Étude du transfert d'habiletés chez des gymnastes experts dans différents maintiens posturaux ». L'objectif principal de son travail était de pouvoir analyser sur un groupe de gymnastes experts les effets d'un entraînement dans différents maintiens de postures spécifiques et conditions visuelles. Ces résultats, comparés à d'autres groupes sportifs montrent entre autres que la posture unipédique avec les yeux ouverts serait une posture adéquate pour analyser les effets de l'entraînement

en gymnastique. La discussion de ces expérimentations s'exprime sur la problématique du transfert d'habileté dans les activités physiques et sportives.

2) L'équilibre en planche à voile et diamètre du wishbone

Mots clefs : Simulateur, windsurf, wishbone

Introduction. La pratique du Windsurf est souvent chez le sportif en début d'apprentissage synonyme de douleurs musculaires, de crampes ou de tétanies. Il en est de même pour l'expert qui l'exerce de manière intensive. Ces effets surviennent de manière prépondérante au niveau des avant-bras (Loquet, 1983⁵⁰⁶ ; Meurgey, 1994⁵⁰⁷). Un autre aspect de la pratique de ce sport, est l'instabilité et la recherche permanente d'équilibre par le pratiquant (Gheluwe, Huybrechts et Deporte 1988⁵⁰⁸). En effet, pour être performant, le windsurfer doit être en symbiose avec sa planche, et donc s'adapter à tous les mouvements et les contraintes dus aux vagues et aux vents (Robin, 2000⁵⁰⁹). Nous avons donc mis en place un simulateur de planche à voile permettant d'enregistrer les données posturologiques par l'intermédiaire d'une plate-forme de forces et les données électromyographiques par un jeu d'électrodes disposées à la surface de la peau. Ceci dans le but d'analyser l'influence du diamètre du wishbone et du type de préhension sur la performance du véliplanchiste.

Méthode et protocole. Six windsurfers volontaires de niveau régional ont participé à cette étude. Leurs caractéristiques anthropométriques âge, taille, poids sont les suivantes : 22,4 ($\pm 2,7$) ans, 174,3 ($\pm 9,3$) cm et 68,9 ($\pm 7,5$) kg. L'exercice s'est déroulé en deux temps, tout d'abord un test de Romberg a été réalisé permettant la visualisation du maintien de la position d'équilibre en statique pour chacun des sujets et dans un second temps, une décomposition en 6 passages de 2 minutes sur le simulateur (Figure 89), un passage correspondant à une force de vent et un diamètre de wishbone, sachant qu'il y a deux forces de vent (Vent modéré et vent fort correspondant en charge respectivement à 15 et 25kg) et trois diamètres de wishbone (28mm, 30mm et 32mm) déterminés par questionnaire auprès de pratiquants. Lors de chaque passage sur le simulateur, le véliplanchiste adopte 4 positions de mains sur le wishbone

⁵⁰⁶ Loquet H. *Etude électromyographique sur simulateur de la pratique de la planche à voile*. Thèse de médecine, université de Lille, 1983.

⁵⁰⁷ Meurgey B. Electromyographie globale et individualisation de l'entraînement. *Science et Sports*, 9: 19-25.

⁵⁰⁸ Gheluwe B., Huybrechts P. et Deporte E. Electromyographic evaluation of arm and torso muscles for different postures in Windsurfing. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1988, 4: 156-165.

⁵⁰⁹ Robin J. Etude biomécanique analytique de l'attitude du véliplanchiste. *Cinésiologie*, 2000, 190 : 61-65.

différentes (2 positions par main : Supination ou Pronation), et ceci de manière aléatoire pour éviter les effets d'ordre.

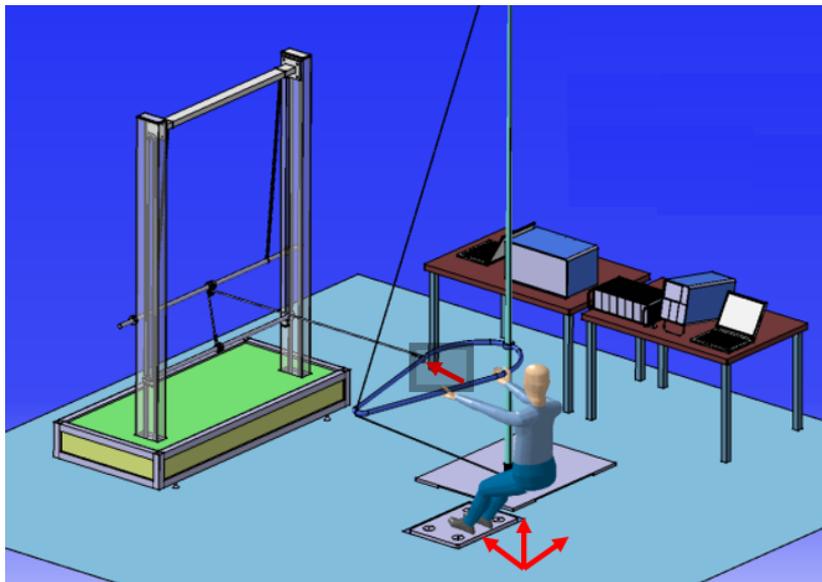


Figure 88. Vue en perspective du simulateur terrestre de planche à voile.

Résultats et discussion. L'objectif de notre étude consistait dans un premier temps, à élaborer et vérifier la validité de notre simulateur terrestre de planche à voile en recréant en laboratoire un environnement et des contraintes s'exerçant sur le windsurfer les plus proches possibles de la réalité. Dans un second temps, nous voulions mettre en évidence une position des mains sur le wishbone la plus économique pour l'activité des muscles des avant-bras, notamment les fléchisseurs superficiels des doigts (Figure n°90), mais également d'étudier la posture et l'équilibre du windsurfer. Dans un second temps, nous voulions mettre en évidence une position des mains sur le wishbone la plus économique pour l'activité des muscles des avant-bras, notamment les fléchisseurs superficiels des doigts (Figure n°91), mais également d'étudier la posture et l'équilibre du windsurfer.

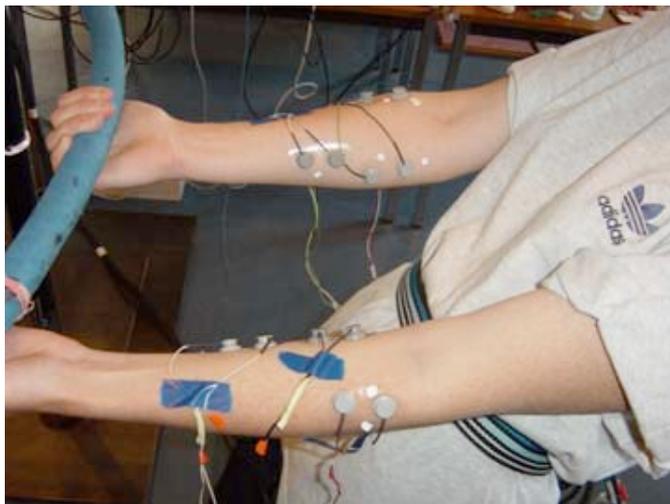


Figure 89. Positionnement des électrodes sur les avant-bras de la main avant (1) et arrière (2).

Sur le plan électromyographique, la position la plus économique pour les avant-bras et selon les muscles étudiés, se révèle une préhension du wishbone de type supination pour les deux mains (SS). 68 % des sujets sollicitent de manière minimale leurs avant-bras ($p < 0,01$) quand ils utilisent un diamètre de wishbone de 28 mm (Figure 3. Exemple pour 25 kg). Ce qui est vrai seulement pour 32 % à 30 mm et 1 % à 32 mm. La technique de saisie la moins coûteuse à 42 % ($p < 0,001$) des sujets se note quand les deux mains sont en supination (SS). Les sujets se rééquilibrent très rapidement en s'opposant à la traction exercée, en déportant le centre de pression en arrière. Cependant, cette préhension ne semble pas être particulièrement utilisée par les windsurfers. Une confirmation de cette position économique des mains engendrerait des reconsidérations de la part des windsurfers afin d'optimiser leurs performances. Concernant les acquisitions de la plate-forme de force sur 5'', le déplacement du centre de pression ($26,2 \pm 6,9$ cm $\Phi 32F15$ à $34,7 \pm 13,2$ cm $\Phi 32F25$) et sa vitesse ($5,2 \pm 1,4$ cm/s $\Phi 32F15$ à $6,9 \pm 2,6$ cm/s $\Phi 32F15$), entre autres variables, révèlent au test ANOVA de Friedman des différences significatives à $P < 0,05$ pour la F15, mais pas pour la F25. Les sujets réalisent de meilleures performances stabilométriques avec F15 selon le $\Phi 32$ pour F15 et $\Phi 28$ pour F25. En ce qui concerne l'étude des différents diamètres de wishbone, se dégage de manière tout à fait notable que le plus petit diamètre (28 mm) permet un plus grand confort musculaire de navigation. Cela a un intérêt pour non seulement les pratiquants, mais également pour les constructeurs et les designers de matériel qui y trouveront des informations aidant leurs choix d'innovation.

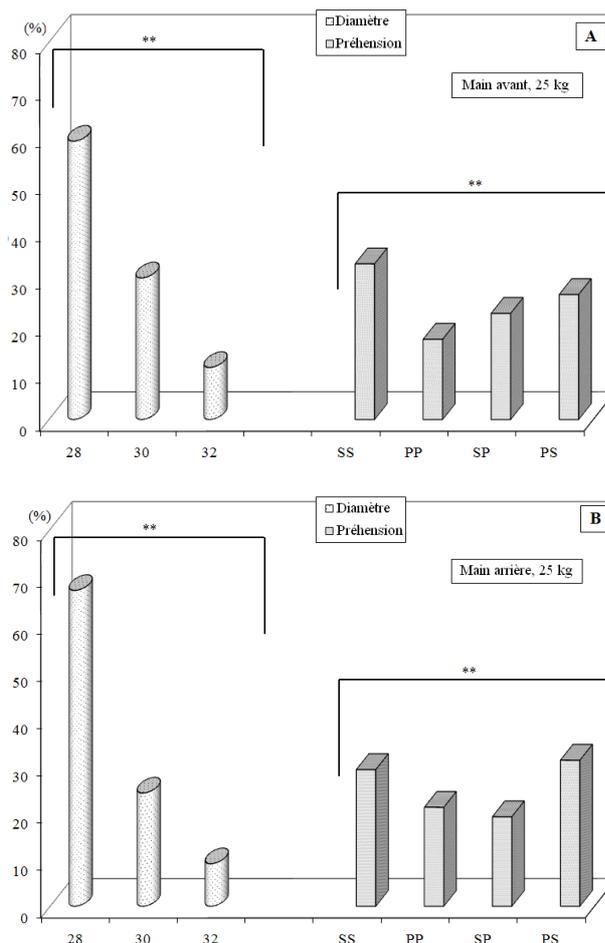


Figure 90. Effet d'une traction de 25 kg sur la technique (A. Main avant / B. Main arrière).

Conclusion. L'activité des muscles fléchisseurs des doigts est minimisée par une position des mains en supination. De plus, le diamètre de wishbone de 28 mm permet la plus faible activité des muscles fléchisseurs des doigts. Pour ce qui est des techniques de redressement du wishbone, elles varient beaucoup entre les sujets et l'équilibre en découlant est de meilleure qualité quand les deux mains sont dans la même position. Cette étude fournit des informations nouvelles aux windsurfers et aux designers de matériel, mais doit se poursuivre en soufflerie avec un plus grand nombre de sujets pour mieux individualiser le matériel et optimiser les performances selon des variables anthropométriques et de forces musculaires spécifiques.

Perspectives et limites. C'est une étude qui aurait mérité de se poursuivre avec un étudiant en thèse en combinant d'autres instruments de mesures, analyseurs de gaz fixes ou portables (type k4, de Cosmed), appareil d'acquisition de fréquence cardiaque selon différents protocoles de contraintes mécaniques imposées...

3) Pied directeur dominant lors de la propulsion et/ou du contrôle postural ?

Mots clefs : football, équilibre, pied dominant

Introduction. La pratique intensive du football augmente le risque de blessure d'autant plus si les sujets présentent des déséquilibres musculaires (Croisier et coll., 2008⁵¹⁰ ; Lehance et coll., 2009⁵¹¹) et/ou posturaux (Tropp & Odenrick, 1988⁵¹² ; Hrysomallis, 2011⁵¹³ ; Teixeira et coll., 2011⁵¹⁴). En moyenne, un joueur de football élite souffre de 1,5 à 7,6 blessures, toutes les 1000 heures d'entraînement et 12-35 blessures chaque 1000 heures de match (Longo et coll., 2012⁵¹⁵). L'objectif de cette étude est de détecter avec des tests simples et rapides l'existence de répartitions inégales de variables cinématiques et dynamiques posturales entre les membres inférieurs lors de sauts verticaux ou du maintien de postures orthostatiques.

Matériel et méthode. 21 footballeurs d'un centre de formation (19,8±1,3 ans, 73,3±9,9 kg, 179,3±8,1 cm) réalisent sur un système d'acquisition composé de deux capteurs à 6 axes (100 Hz) placés sous chacun des pieds respectifs, 3 essais de maintien postural de 10'' yeux ouverts (YO) et fermés (YF) ainsi que 3 sauts verticaux non maximaux de type CMJ entrecoupés de 15'' de relâchement (Figure 92). Les données filtrées renseignent après traitement, sur la cinématique des statokinésigrammes du CP de chaque appui. Une analyse fréquentielle par transformée rapide de Fourier complète l'étude des variables posturologiques classiques maximales et moyennes (longueur, surface elliptique, vitesse) alors que des équations spécifiques permettent de calculer lors des sauts, les puissances moyennes et de pics des deux membres inférieurs.

⁵¹⁰ Croisier J.-L., Ganteaume S., Binet J., Genty M., Ferret J.-M. Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: a prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 2008, 36(8): 1469-75.

⁵¹¹ Lehance C., Binet J., Bury T., Croisier J.-L. Muscular strength, functional performances and injury risk in professional and junior elite soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2009, 19(2): 243-51.

⁵¹² Tropp H., Odenrick P. Postural control in single-limb stance. *Journal of Orthopaedic Research*, 1988, 6(6): 833-9.

⁵¹³ Hrysomallis C. Balance ability and athletic performance. *Sports Medicine*, 2011, 41(3): 221-32.

⁵¹⁴ Teixeira L., de Oliveira D., Romano R., Correa S. Leg preference and interlateral asymmetry of balance stability in soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2011, 82(1): 21-7.

⁵¹⁵ Longo U., Loppini M., Cavagnino R., Maffulli N., Denaro V. Musculoskeletal problems in soccer players: current concepts. *Clinical Cases in mineral and bone metabolism*, 2012, 9(2): 107-11.

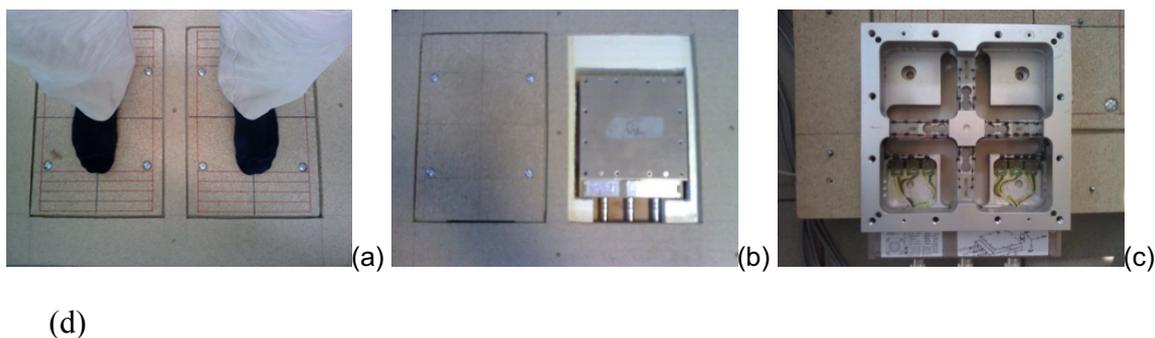
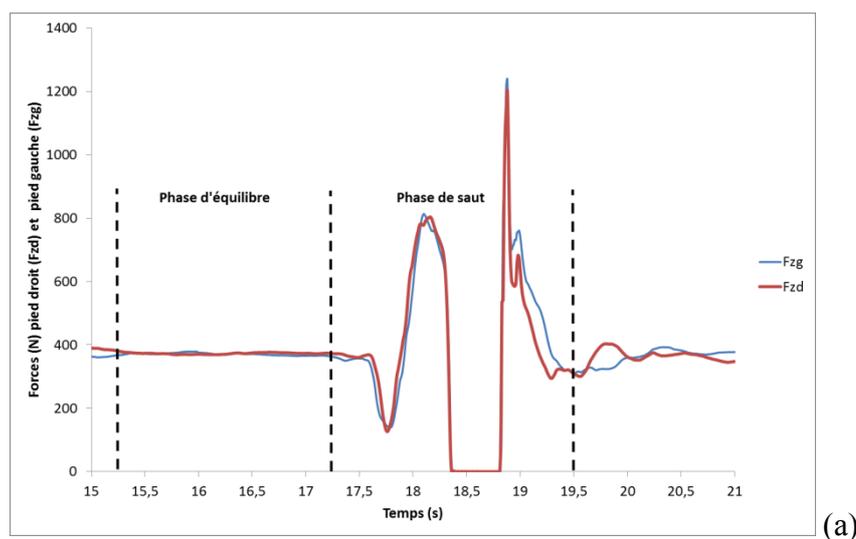
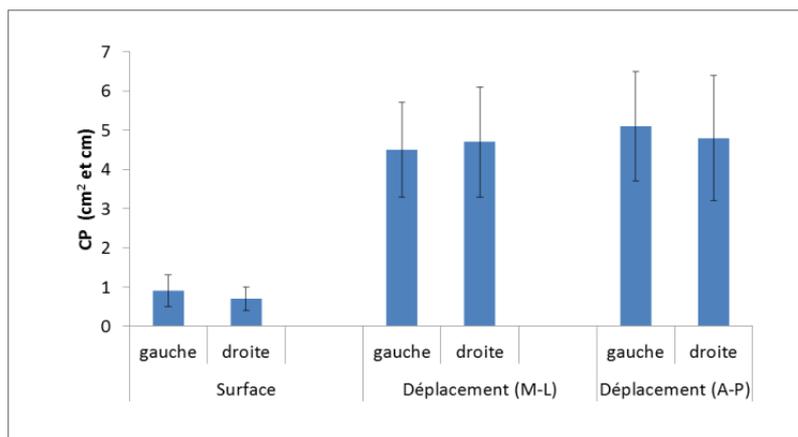


Figure 91. Matériel expérimental (a,b) composé de 2 capteurs (c) permettant d'enregistrer les 3 forces et les 3 moments (d).

Résultats et Discussion. Les sujets ne présentent pas des différences significatives dans la répartition de leur poids respectivement à droite (50,7%) et à gauche (49,5%) de même concernant les durées de suspensions caractérisant les puissances sous maximales des 2 membres inférieurs ($0,314 \pm 0,06$ s et $0,312 \pm 0,07$ s). Cependant, l'analyse des composantes stabilométriques révèle pour la plupart des sportifs un pied directeur postural au rôle plus ou moins déterminant selon les différences bilatérales, un fait important à sensibiliser pour l'entraînement technique des joueurs (Figure 93).





(b)

Figure 92. (a) Caractéristiques dynamiques sur l'axe vertical F_z (sous le pied droit (F_{zd}) et le pied gauche (F_{zg}) d'une phase de stabilisation et d'un saut vertical exécuté par un sujet de 75 kg sur le matériel expérimental. (b) Caractéristiques du centre de pression (surface, déplacements M-L et A-P).

4) Évaluation posturale et cycle proprioceptif préventifs de blessures chez le footballeur

Mots clefs : football, proprioception, prévention, blessure

Introduction. Parmi les traumatismes articulaires chez le footballeur, l'entorse de la cheville représente l'une des pathologies les plus fréquentes avec près de 30% de blessures, liées principalement aux chocs entre joueurs, aux tacles, à une mauvaise réception lors d'un saut ou un blocage l'instant d'une rotation sur une jambe. Les programmes de prévention ont prouvé leur efficacité, cependant peu de moyens existent pour évaluer si les sportifs présentent des instabilités synonymes de futures blessures et incapacités. L'objectif de ce travail est d'établir une évaluation fiable et reproductible qui permettrait de recenser des sujets potentiellement victime d'entorses à moyen terme (Figure 94).

Protocole. 11 joueurs de football DH : Âge $23,61 \pm 3,59$ ans ; Taille $1,77 \pm 0,05$ cm ; Masse $72,17 \pm 6,94$ kg ; IMC $22,91 \pm 1,80$ kg.m⁻² ; Plus de 5 heures / semaine. 4 tests posturologiques : Assis-debout (Tad), Debout-accroupi-debout (Tdad), Position monopodale réglée (Tpmr), Limite de stabilité de cheville (Tlsc), yeux ouverts (yo) et fermés (yf). Plateforme DP40 Biorescue (Fréquence d'acquisition de 40 Hz), Avant (i) et après (f) un cycle de 15 séances de 20' de proprioception.

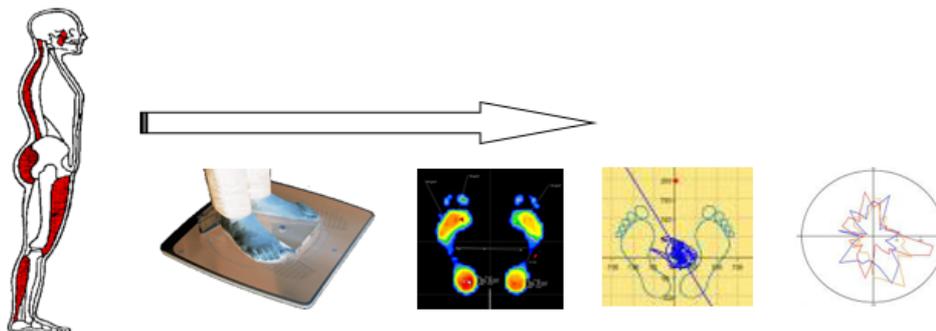


Figure 93. De l'équilibre global à l'étude du centre de pression.

Résultats. Les résultats montrent sur les caractéristiques cinématiques du centre de pression notamment la vitesse moyenne (V), la longueur (L) et la surface elliptique (S) entre les tests initiaux et finaux (i)/(f) des différences significatives avec une amélioration de l'ordre de 36% à $p < 0,01$ au test non paramétrique de Wilcoxon. On constate entre autres (yo) au Tad (V : $2,06 \pm 0,47 / 1,30 \pm 0,21$ cm/s ; L : $16,45 \pm 3,68 / 10,35 \pm 1,62$ cm), au Tdad (V : $2,15 \pm 0,40 / 2,03 \pm 0,21$ cm/s ; L : $46,90 \pm 8,69 / 44,55 \pm 4,70$ cm) au Tpmr pied droit (S : $213,0 \pm 165,84 / 108,9 \pm 58,03$ mm² ; V : $1,44 \pm 0,23 / 1,21 \pm 0,15$ cm/s) et Tpmr gauche (S : $154,60 \pm 168,78 / 91,50 \pm 27,42$ mm² ; V : $1,62 \pm 0,53 / 1,35 \pm 0,22$ cm/s) des progrès dans la stabilisation.

Discussion. Il est possible d'améliorer la stabilité des sujets en déterminant d'une part les faiblesses posturales lors de tests rapides adaptés et reproductibles et d'autre part en élaborant avant la séance d'entraînement technique ou physique des situations proprioceptives et des jeux d'équilibre/déséquilibre. Ces exercices améliorent la coordination et l'anticipation des contractions musculaires péri-articulaires, réduisant ainsi les mouvements parasites de compensation qui servent habituellement à favoriser la stabilisation posturale. La réduction de ces mouvements parasites, abaisse l'entropie du système, influençant directement le risque de lésions articulaires, ligamentaires et musculaires. La multiplicité et la complexité des récepteurs sensibles aux étirements et aux pressions de la cheville, nécessitent de nos jours l'utilisation d'appareils sophistiqués pour optimiser qualitativement la prévention et la rééducation de la cheville chez les sportifs et notamment les footballeurs.

Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

Depuis vingt ans, sur la thématique du football, nous avons réalisé de nombreux encadrements de mémoires d'étudiants en master 1 et 2, dans le cadre de la filière EOPS (Entraînement et Optimisation de Performance Sportive), mais aussi EM (Education et motricité) notamment sur : l'impact des charges d'entraînement sur les modifications de certaines variables, comme la force, la vitesse, la technique, l'équilibre, la posture... mais aussi d'autres plus spécifiques et originales concernant la perception visuelle, la raideur musculaire, la santé, le plaisir comme source de réussite sociale...

En effet, nous accordons dans nos enseignements avec les étudiants débutants la pratique du football et les étudiants optionnaires, une importance particulière à l'apprentissage et à l'entraînement du football par le jeu, celle entre autres des jeux réduits, l'essence même de cette discipline. Le jeu, fondamental comme source d'apprentissage dans le plaisir, la joie, la motivation, celle qui permet d'annihiler la conscience du temps qui passe, la perception de fatigue, la météo difficile...

1) Les jeux réduits alternative favorable à la responsabilité dans la prise de décision

Mots clefs : football, jeux réduits, prise de décision

Introduction. Dans la plupart des activités sportives, l'optimisation de la performance du pratiquant dépend de sa capacité à mobiliser un certain nombre de facteurs pour favoriser la prise d'information et sélectionner la stratégie motrice la plus adaptée. Dans cette démarche, la prise de décision, centrale à la qualité de l'acte moteur dépend de l'activité d'analyse et de la compréhension de la situation. St-Louis-Deschênes et Elleberg ont réalisé récemment (2013)⁵¹⁶ une revue de littérature sur l'exercice physique aigu et la performance cognitive chez l'enfant et l'adolescent leur permettant de conclure sur les bienfaits d'une activité physique variant entre 10 et 50 minutes, selon une intensité moyenne impliquant des activités de coordination motrice, une prise de décision rapide et des interactions sociales. Comme ils le soulignent d'un point de vue pratique, il est encourageant de constater que ces paramètres sont

⁵¹⁶ St-Louis-Deschênes M., Elleberg D. L'exercice physique aigu et la performance cognitive chez l'enfant et l'adolescent. *Science & Sports*, 2013, 28(2): 57-64.

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

facilement reproductibles dans les jeux de récréations scolaires, les cours d'éducation physique et les activités sportives dans les clubs. Au football, la pratique des jeux réduits, depuis des confrontations répétitives et variées entre des rapports de collectifs « médiés » par un ballon selon des contraintes de jeu et des objectifs spécifiques à atteindre, se prête favorablement et naturellement aux prises de décisions et à la responsabilisation des actions de jeux des joueurs. En effet, avec la pratique du football, le sujet joueur au centre des relations qu'il enchaîne avec ses partenaires, les adversaires et le ballon, stimule sa motricité pour assurer selon son investissement le maintien ou le développement de son capital physique et psychique. Dans cette activité, le pratiquant doit résoudre une multitude de problèmes liés à des opérations perceptives et décisionnelles concernant l'opportunité d'engager son action motrice.

Spéculations. La complexité des situations sportives rend difficile in situ l'étude spécifique du jugement et de la prise de décision, car la multiplicité des paramètres déterminant la performance est peu compatible avec la rigueur méthodologique qui préconise d'isoler les variables pour mieux en apprécier les effets. Cependant, il convient de penser légitimement que le joueur influant dans le jeu n'est pas forcément celui qui possède les capacités les plus développées, mais plutôt celui qui sait gérer au mieux ses possibilités, organiser de façon optimale l'utilisation de ses ressources. En définissant une combinaison convenable entre ses capacités intellectuelles et ses qualités athlétiques, l'un des facteurs de l'optimisation de la performance du footballeur réside dans son habileté à bien traiter l'information. La pratique du jeu réduit sollicite de manière permanente, dans les postures, les locomotions, les techniques, les tactiques, les démarches de prises de décision. Mais ce qui se révèle fondamentalement formateur dans ces exercices collectifs c'est la brièveté, l'immédiateté de la réponse suite à une action entreprise par le joueur. En effet, très rapidement il obtient la réponse sur l'efficacité de l'action ou du geste accompli.

La revue de littérature réalisée depuis la base de données bibliographique Pubmed sur une période de 10 ans (2004-2014) révèle globalement 76 articles avec les termes « small sided soccer », mais aucun avec le croisement de l'expression « decision-making ». Malgré une prise en considération de cette thématique depuis ces cinq dernières années (57 articles) du rôle des jeux réduits sur le constat spécifique des exigences physiologiques, physiques et techniques des jeux réduits (patrons locomoteurs, fréquences cardiaques, quantification des mouvements

techniques, perception d'effort) seulement deux articles émergent Young et Rogers en 2014⁵¹⁷, mais surtout Davids, Araújo, Correia et Vilar en 2013⁵¹⁸ avec les rubriques « small-sided games AND decision-making ». Cette dernière étude, synthèse d'autres recherches, montre que les contraintes des jeux réduits peuvent faciliter l'émergence de coordinations interpersonnelles dont les joueurs d'équipes peuvent bénéficier.

Discussion sans consensus. L'interprétation des effets de la pratique des jeux réduits sur la prise de décision s'avère difficile, car elle s'organise autour des démarches conjointes cognitive et physiologique. Dans les jeux réduits, les thématiques de travail technique et tactique, les animations offensives et défensives se côtoient sous l'angle de la confrontation entre joueurs. L'adhésion s'avère facile et l'investissement physiologique et cognitif formateur pour améliorer dans le conflit d'un environnement aux logiques de confrontations complexes les niveaux de perception et de prise de décision ; apprentissages perceptifs et décisionnels s'autorégulent dans la répétition des actions. La prise de décision s'exerce dans la démultiplication des prises d'informations, des échanges communicatifs et des actions motrices. L'historique des quantifications de l'activité technico tactique du footballeur lors des matchs est révélatrice de la très faible durée de possession de balle et du nombre réduit de touches de balle par joueur. Ces conséquences obligent le joueur à travailler les composantes de sa condition physique afin d'optimiser les instants cruciaux de lucidité et de prise de décision technique et tactique sur toute la durée des confrontations, d'où la nécessité de jouer à effectif réduit et intensément.

2) Test de perception visuelle chez le footballeur selon le poste

Mots clés : Football, jeu, vision.

L'étude compare pour différents groupes de footballeurs à onze, la capacité à percevoir et à localiser des détails qui discriminent des figures. Notre échantillon est constitué de 40 footballeurs répartis en 3 groupes (17 Défenseurs dont 2 gardiens, 12 Milieux de terrain et 11 Attaquants). Ces groupes sont soumis aux mêmes conditions de visualisation de 3 séries de 20 diapositives défilant respectivement à 4, 3 et 2 secondes sur écran d'ordinateur. Chaque diapositive comporte deux images de situation de jeu footballistique distinctes d'une modification. Sur celle du bas, le sujet devait trouver l'erreur et l'indiquer explicitement.

⁵¹⁷ Young W., Rogers N. Effects of small-sided game and change-of-direction training on reactive agility and change-of-direction speed. *Journal of Sports Sciences*, 2014, 32(4) : 307-314.

⁵¹⁸ Davids K., Araújo D., Correia V., Vilar, L. How small-sided and conditioned games enhance acquisition of movement and decision-making skills. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2013, 41(3) : 154-61.

L'analyse statistique des résultats montre une différence significative ($p < 0,01$) discriminante au niveau de la diapositive défilant à 2 secondes, cependant les résultats obtenus évoluent dans un ordre croissant de bonne réponse : $D < M < A$.

Introduction. La recherche perpétuelle de l'amélioration des performances incite à évaluer et à optimiser les moindres détails, même ceux qui semblent insignifiants autour de la préparation du sportif. Dans cette conjoncture, la prise en compte des éléments qui contribuent à la prestation en situation de match est de plus en plus considérée. La miniaturisation et l'adaptation du matériel aux situations d'efforts intenses permettent d'élaborer des hypothèses au plus près des préoccupations de la discipline. On pense notamment à l'influence de trois outils qui ont progressivement changé la représentation du jeu des entraîneurs, des préparateurs physiques et des joueurs eux-mêmes ; l'enregistrement imagé du jeu, l'accessibilité à la physiologie de l'effort, le traitement informatique et statistique de l'ensemble de ces données associées, faisant émerger des variables quantitatives multiples, des paramètres qualitatifs sur l'organisation des actions des joueurs et des configurations de jeux. L'examen systémique et dynamique des différentes composantes du jeu et de sa performance devrait permettre d'anticiper précisément dans les confrontations et d'envisager des choix stratégiques et tactiques rationnels.

Cependant, l'étude dans le contexte du jeu de certains paramètres est très difficile, en occurrence au cours de l'action, l'évaluation de la perception visuelle, même chez le gardien confronté à une situation plus ou moins standardisée comme le coup de pied de but, où le plus souvent les situations sont considérablement aménagées. En sport, la prise de décision est un facteur de performance dont le degré d'importance varie en fonction des pratiques. Dans les sports collectifs comme le football, le joueur doit s'adapter en permanence aux rapports d'oppositions individuels et collectifs avec des délais très brefs. Sous la pression des adversaires, mais aussi des partenaires autour de la possession du ballon, le joueur doit prendre des décisions justes qui conditionnent son déplacement, sa technique et finalement son jeu. La prise de décision dépend entre autres de la qualité de sa perception visuelle dont les informations encodées facilitent la pertinence et la précision de ses décisions (Poplu et coll., 2008⁵¹⁹).

⁵¹⁹ Poplu, G., Ripoll, H., Mavromatis, S., Baratgin, J. How do expert soccer players encode visual information to make decisions in simulated game situations? *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2008, 79(3): 392-398.

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

Le football présente la particularité de solliciter certaines qualités et aptitudes à des degrés plus ou moins importants, selon le positionnement et donc le poste du joueur sur le terrain. L'objectif de cette étude est de percevoir, selon la zone de jeu des joueurs, s'il existe des différences significatives dans la prise d'information visuelle et en particulier la détection d'erreurs qui pourrait dans le jeu se caractériser par des prises de décisions contraintes et perturbées.

Protocole. Un échantillon de 40 footballeurs (Âge $21,13 \pm 3,30$ années ; masse $72,9 \pm 7,77$ kg ; taille $179,3 \pm 7,11$ cm) de divers niveaux amateurs et tous volontaires pour réaliser les tests est constitué. Les joueurs pratiquent de 6 à 8 heures de football par semaine et cela depuis au minimum cinq années. Le groupe est divisé en 3 sous-groupes (homogènes en âge, années et niveau de pratique) selon la place que chaque joueur occupe régulièrement sur un terrain de football à onze, à savoir : 17 défenseurs, 12 milieux et 11 attaquants. 3 séries de 20 diapositives (Exemple dans la Figure 95) avec des durées de présentation de 4, 3 et 2 secondes sont présentées aux sportifs dans un ordre aléatoire sur un écran d'ordinateur portable de 15,4 pouces. Chaque sujet selon la durée impartie, doit rapidement avec le doigt localiser et désigner par diapositive l'erreur entre deux images footballistiques superposées. Avant le début du test, il s'exerce sur une série de quelques diapositives. Au préalable afin d'homogénéiser les séries de 20 diapositives en fonction des durées de localisation d'erreur, les 60 images les composant sont testées selon différents ordres sur un groupe de 12 personnes.



Figure 94. Exemple réduit d'image présentée aux sujets.

Résultats et discussion. Le test ANOVA de Friedman montre au niveau intragroupe qu'il existe des différences significatives entre les séries (4'', 3'', 2'') pour les défenseurs ($p < 0,05$), mais aussi les milieux ($p < 0,01$). Cette distinction résulte des écarts de performance entre les séries 4'' et 2'' où le pourcentage de bonne réponse décline respectivement de 54,7% à 37,7% et 64,2% à 40,9%. Le test ANOVA de Kruskal-Wallis met en évidence à $p < 0,01$ entre les

groupes, l'aspect discriminant de la série 2'' (Figure 2) où les attaquants obtiennent de meilleures performances ($10,9 \pm 2,21$) que les milieux ($8,2 \pm 2,9$) et les défenseurs ($7,5 \pm 2,3$). Dans le maillage complexe des facteurs qui contribuent à atteindre la performance en sport collectif, l'étude de la perception visuelle est souvent négligée pourtant déterminante dans l'anticipation des actions de jeu collectif, la localisation spatiale et posturale pour prendre la bonne décision en y associant le déplacement pour l'exécution technique appropriée. Le protocole laisse à penser une expérimentation plus discriminante où les sujets tout en contrôlant le ballon et équipés d'un système de suivi du regard (eye-tracking), seraient confrontés à des prises de décision par rapport à des situations de jeux exposées grandeur nature.

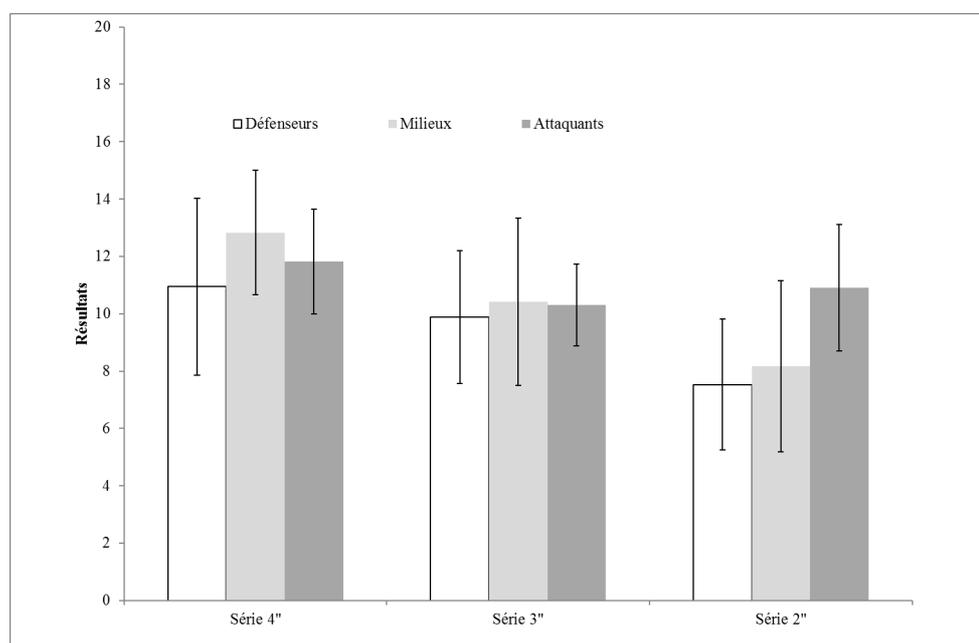


Figure 95. Histogramme des moyennes et des écarts-types des résultats aux séries de 20 diapositives présentées selon les délais 4, 3 et 2 secondes et en fonction des zones de jeu.

3) État des lieux sur la recherche scientifique sur le gardien de football

Mots-clefs : profil de poste, revue de littérature, sémiologie motrice, tests.

Le gardien de but représente une pièce essentielle dans une équipe de football. Il est à la fois le premier attaquant et le dernier défenseur. De plus, la moindre faute se révèle fatale. L'un des objectifs des chercheurs et entraîneurs qui travaillent avec GK est d'obtenir des informations pertinentes sur les caractéristiques physiques, les attributs physiologiques et psychologiques de GK, pour les utiliser efficacement lors de la formation et de la planification des entraînements. Cette présentation a trois objectifs : (a) examiner les principales bases de données bibliographiques pour dresser un bilan sur le profil du GK d'aujourd'hui ; (b) montrer les

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

principaux axes de recherche ; et (c) proposer plusieurs recommandations pratiques pour les entraînements. Proportionnellement au nombre d'études sur le football, celles sur le gardien sont minimales, moins de 1% pour la majeure partie des bases de données bibliographiques. L'essentiel des recherches se centre sur des tests de conditions physiques spécifiques au GK, mais surtout sur les activités de perception et de prises de décision face au tireur lors du penalty.

Chaque année depuis 28 ans, par l'intermédiaire de la compilation des votes d'experts de 60 pays, l'International Federation of Football History & Statistics (IFFHS) publie le classement des meilleurs gardiens de but de football de l'année. En 2014, l'allemand de l'équipe du Bayern Munich, Manuel Neuer est considéré comme le meilleur gardien pour son grand talent, en effet : *« il possède de bons réflexes, a de la vivacité, est capable de relances puissantes et précises (aussi bien au pied qu'à la main), et est un excellent arrêteur de penalty. Il peut aussi assumer un poste analogue à celui du libéro, en multipliant les sorties spectaculaires et efficaces, s'inspirant pour cela des gardiens de handball ».*

La IFFHS a aussi classé les 47 meilleurs gardiens de but de football du XX^e siècle (30 provenant d'Europe, 11 d'Amérique, 4 d'Afrique et 2 d'Asie) où apparaissent entre autres parmi les meilleurs Lev Yachine, Gordon Banks, Dino Zoff, Sepp Maier, Ricardo Zamora, José Luis Chilavert, Perter Schmeichel, Peter Shilton... Même si le jeu a évolué et qu'il est très difficile de mettre en parallèle un gardien avec un autre, au cours de ce temps de la longue durée peut-on déterminer des constantes, des changements de techniques corporelles du gardien afin de les perpétuer ou anticiper des mutations⁵²⁰ pour les adapter au schéma défensif le plus utilisé dans le jeu ? On parle que chaque pays posséderait une école de gardiens de but préparant au style de jeu spécifique, entre autres les gardiens anglais sont réputés pour leur habileté à capter les balles hautes, parce que le jeu aérien est un des fondements du football britannique ? Dans un tout collectif, l'entraîneur élabore-t-il le style de jeu de son équipe en fonction des caractéristiques spécifiques de son gardien, des autres joueurs ? En effet, à chaque style de jeu correspondrait ainsi une technique propre du gardien de but, par exemple, si l'équipe choisit

⁵²⁰ « La transformation de la technique de gardien de but en football par exemple, après la dernière guerre mondiale surtout. Qu'était-elle cette technique jusque-là ? Essentiellement une technique de défense, un art de l'intervention fulgurante et courageuse, un modèle de corps-obstacle. Or une modification déterminante intervient vers le milieu du siècle : le gardien est perçu comme le premier attaquant. Non plus seulement homme de défense, mais homme de «relance». Du coup, naît une technique très neuve : le renvoi de la balle fait à la main pour assurer la précision du tir. Mais du coup aussi s'impose immédiatement une transformation de la défense elle-même. » Vigarello G. Les techniques corporelles et les transformations de leurs configurations. STAPS, 1986, 13(7) : 19-22. [p. 21].

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

une défense à plat, le gardien aura dans ce cas un rôle de libero à interpréter, donc à préparer et s'entraîner (Lesay, 2008)⁵²¹.

Le bon gardien semble finalement le résultat d'une identité alchimique, mélange d'intelligence, d'adaptation, mais aussi de réussite entre ses caractéristiques spécifiques, le style de jeu de son équipe, mais aussi de l'adversaire (Ziv, 2011)⁵²². Il est toutefois indispensable d'élaborer et posséder un modèle de la performance du gardien de but après une étude pluridisciplinaire rétrospective (morphologique, physiologique, technique, tactique, psychologique, sociologique,...) pour faire émerger un patrimoine récurrent de profil à la base constante afin de le perpétuer et de l'enrichir par l'entraînement sans oublier le poids de la part de l'aléatoire et de l'incertitude dans les anticipations, les prises de risque, la chance... qui représente la partie cachée et indispensable de la réussite du gardien (Taleb, 2013)⁵²³.

Depuis une revue de littérature de plusieurs bases de données bibliographiques (Medline, Scholar.google, SportDiscus, ScienceDirect, Sudoc, Sport' docs.insep) en anglais et en français, le but de cette présentation est d'exposer les caractéristiques physiques, physiologiques et de performances techniques du gardien de but; d'exprimer avec ce bilan de recherches et de données scientifiques les axes de recherche qui sont prépondérants pour quelques applications et recommandations pratiques à l'entraînement.

Dans le football moderne, 85% des buts sont marqués de l'intérieur de la surface de réparation et 40% des buts s'inscrivent sur les coups de pied arrêtés. En France, en ligue 1, au cours de la saison 2013-2014, sur un nombre total de 931 buts inscrits, pour une moyenne de 2,4 buts par match, 64 l'ont été sur penalty représentant 6,87% de la totalité. Ces quelques chiffres confortent le rôle particulier et déterminant du gardien de but moderne qui revêt une telle importance dans le jeu qu'il est indispensable de lui proposer un entraînement spécifique. Cependant, au niveau international l'interrogation avec le moteur de recherche PubMed de la plus grosse base de données bibliographique biomédicale Medline (plus de 24 millions de citations) montre que la communauté scientifique s'y intéresse peu, c'est le premier constat atypique et absolu. En effet, on trouve sur la thématique du gardien un nombre réduit d'articles respectivement avec goalkeeper (111 articles), soccer goalkeeper (66), goalkeeper training (33),

⁵²¹ Lesay J. *Les plus grands gardiens de but du football français*. Paris : Calman-Lévy, 2008.

⁵²² Ziv G, Lidor R. Physical characteristics, physiological attributes, and on-field performances of soccer goalkeepers. *International journal of sports physiology and performance*, 2011, 6(4) : 509-24.

⁵²³ Taleb N. *Antifragile : Les bienfaits du désordre*. Paris : Les Belles Lettres, 2013.

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

goalkeeper injury (23) comparativement aux études effectuées sur le soccer (6490), soccer players (3330), soccer player (856), female soccer players (782) et young soccer players (1144).

On peut en déduire que les recherches répertoriées comme telles sur le gardien de but sont largement moindres que celles qui sont réalisées sur l'enfant pratiquant le football ou le football féminin. Proportionnellement à la totalité des études sur le soccer, le gardien de but au football représente 1% des études. En guise de comparaison le football féminin et celui pratiqué par les enfants représentent une plus grande préoccupation avec respectivement 12% et 17,5%. C'est simplement un constat surprenant quand on sait que la moindre faute chez un gardien est très souvent fatale au résultat final d'une rencontre. De plus, analysés dans le détail, certains articles ne sont pas consacrés exclusivement au gardien, mais ses aptitudes sont comparées aux autres joueurs. La catégorisation des études montre que l'essentiel des recherches au-delà de se centrer sur des tests d'évaluations et de comparaisons d'aptitudes physiques et d'habiletés techniques analysent les activités de perception et de décision lors de la confrontation en face à face avec un tireur de penalty, une situation très standardisée, il est vrai essentielle compte tenu de la statistique des buts marqués, mais non fondamentale par rapport au registre physique, technique et tactique lors des matches. Ce constat est similaire avec les autres bases de données, mais surtout sur le plan national avec le catalogue du système universitaire de documentation bibliothèques et centres de documentation de l'enseignement supérieur et de la recherche (SUDOC) comprenant plus de 10 millions de notices, qui révèle une seule thèse en traumatologie, 2 documents audiovisuel consacrés spécifiquement à la formation et l'entraînement du gardien de but au football et 12 livres qui laissent libre cours à l'imaginaire de la recherche sur l'optimisation du rôle du gardien sa prépondérance dans un jeu « pour ne pas prendre de but et en marquer » (Bray, 2006)⁵²⁴.

4) Tests d'attention chez le jeune gardien de football

Mots clés : football, gardien, jeu, vision.

Des processus cognitifs de perception extrinsèque et intrinsèque permettent au gardien de but en football d'intervenir et même d'anticiper judicieusement ses actions. 7 jeunes gardiens, en préformation, participent à une étude sur l'attention visuelle. Ils réalisent avant et après un cycle d'entraînement spécifique de 8 semaines, 3 tests de perceptions visuelles, sur la détermination

⁵²⁴ Bray K. *Comment marquer un but : les lois secrètes du football*. Paris : JC Lattès, 2006.

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

du positionnement de cibles clignotantes, la localisation de cibles à trajectoires multiples et l'anticipation d'un plongeon depuis l'attitude d'un tireur de pénalty. L'étude révèle qu'il y a des progrès dans les 2 derniers tests respectivement de 17,4 % et de 6,4%. Ces observations peuvent avoir des implications pour le développement de programmes de formation à la perception et l'anticipation, mais aussi pour identifier le potentiel de joueurs.

Introduction. L'attention visuelle joue un rôle important dans les sports individuels (Williams et coll., 1999⁵²⁵), mais se complexifie avec le nombre de paramètres instables dans les sports d'équipe où les joueurs doivent percevoir simultanément les alternatives de positionnements et de déplacements des adversaires et de leurs partenaires selon leur situation et la balle dans le jeu. Dans ces milieux changeants, l'anticipation permet d'optimiser la vitesse de récupération ou de transmission de la balle dans des espaces de jeux très réduits et selon des durées qui ne peuvent s'expliquer que par cette prise d'avance qui enrichit les aspects techniques et tactiques des joueurs et par conséquent de l'équipe. Chez le gardien de but où la moindre erreur est souvent fatale pour l'équipe, le système visio-perceptif doit être particulièrement exercé, car il conditionne le positionnement de ses appuis qui caractériseront la qualité de ses interventions techniques (Spratford et coll., 2009⁵²⁶; Morya et coll., 2003⁵²⁷). Le but de l'étude réalisée sur de jeunes gardiens est de tester l'effet de 8 semaines d'entraînement perceptivo-moteur spécifique.

Protocole expérimental. 7 gardiens en préformation (Âge $10 \pm 1,1$ ans ; taille $1,47 \pm 0,1$ m ; masse $34,7 \pm 2,3$ kg) qui s'entraînent tous ensemble sur les mêmes ateliers participent à l'étude. Ces sportifs sont confrontés à 3 batteries de tests, tout comme un groupe témoin de 17 sujets sédentaires du même âge, d'une classe de sixième. Ils indiquent leurs réponses avec un pointeur laser sur la projection, située à une distance de 2 m, d'une présentation assistée par ordinateur.

T1, un test de perception visuelle de cibles statiques. Il est réalisé afin de déterminer la lecture du positionnement de plusieurs joueurs et leurs déplacements pour le gardien de but. Le sujet doit localiser le déplacement de cibles (soit des joueurs adverses, soit ses partenaires) sur des situations offensives adverses dans 80 diapositives. À chaque diapositive, un joueur change de position et ainsi de suite sur l'ensemble de la manipulation. Le test est de difficulté

⁵²⁵ Williams A. M., Davids, K., & Williams, J. G. *Visual perception and action in sport*. London: E & F.N Spon, 1999.

⁵²⁶ Spratford W, Mellifont R, Burkett B. The influence of dive direction on the movement characteristics for elite football goalkeepers. *Sports Biomechanics*. 2009, 8(3) : 235-44.

⁵²⁷ Morya E., Ranvaud R., Pinheiro WM. Dynamics of visual feedback in a laboratory simulation of a penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 2003, 21(2) : 87-95.

progressive, car le nombre de cibles à repérer augmente de 1 à 4 toutes les 20 diapositives. La durée de l'observation et du traitement visuel s'élève de façon proportionnelle, c'est-à-dire de 1 seconde jusqu'à 4 secondes pour 4 cibles. La transition entre les diapositives est à vitesse « rapide » et d'une durée de 1 seconde. Le sujet peut réaliser un total de 80 points s'il localise l'ensemble des modifications de 1 à 4 par diapositives (Figure 97).

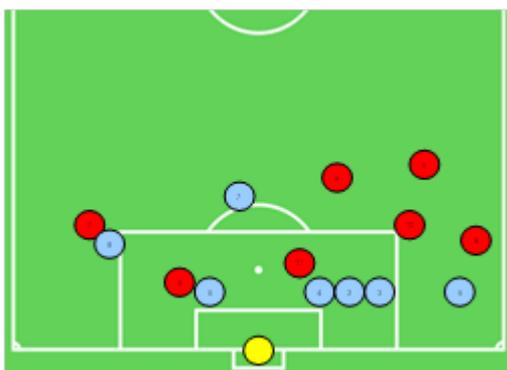


Figure 96. Test de perception visuelle de cibles statiques.

T2, un test de perception visuelle de cibles à trajectoires multiples qui permet d'observer les aptitudes d'un sujet à observer la trajectoire de plusieurs cibles en mouvement. De manière similaire au test précédent, les sujets doivent dépister les trajectoires d'un certain nombre d'objets identiques et désigner au final leur position. Le test se réalise à partir de vidéos où les sujets sont confrontés à 8 articles identiques, après un moment, certains d'entre eux clignotent, indiquant leur statut comme cibles. Tous les articles identiques commencent alors à se déplacer de manière imprévisible sur l'écran. La tâche à réaliser pour les sujets est de repérer les cibles qui clignotent à la fin de la vidéo malgré leurs déplacements consécutifs. La manipulation se compose de 20 diapositives, où chaque diapositive possède une durée de 10 secondes et une seule vitesse de passage. Le test se caractérise par une difficulté croissante toutes les 5 diapositives le nombre de cibles à détecter augmente jusqu'à 4. Le candidat totalise un point par bonne réponse pour chaque présentation. (Figure 98)

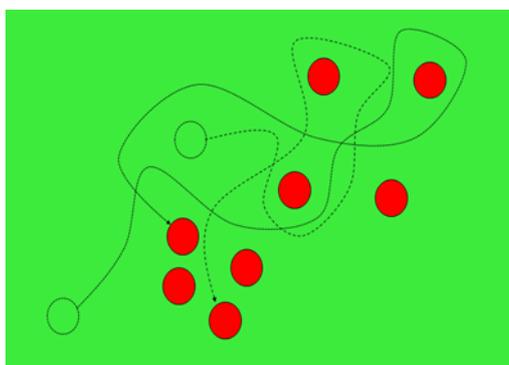


Figure 97. Test de perception visuelle de cibles à trajectoires multiples.

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

T3, un test dit de perception visuelle spécifique au gardien de but. Lors du dernier test, le sujet est mis face à une situation filmée de penalty et doit simuler un plongeon en indiquant la destination supposée du ballon. Il s'agit au préalable de l'enregistrement sur un terrain de football de 36 tirs au but exécutés par 18 joueurs de football qui réalisent deux passages. La caméra protégée, est positionnée dans un but. Lors du passage du test, le sujet doit analyser le tireur sur sa prise d'élan et sa frappe juste avant qu'il touche le ballon afin de déterminer l'action motrice et de proposer une parade. Le participant marque un point pour chaque choix convenable sur un maximum de 36 (Figure 99).



Figure 98. Test dit de perception visuelle spécifique au gardien de but.

Après le passage de la batterie de tests considérée comme «Prétest», les gardiens de but sont soumis à 8 semaines d'entraînement. Chaque séance d'entraînement (soit 3 par semaine) est composée d'une situation spécifique à l'entraînement visuel. Notons qu'en terme pédagogique, chaque exercice perceptif est toujours couplé à des aspects techniques afin de rester au plus proche des situations de compétition. Dans la planification du club, les joueurs ont 3 séances par semaine dont deux obligatoirement spécifiques. Les séances d'une durée de 1h45 se composent de 20 minutes d'entraînement perceptif. La durée totale de l'étude est de 10 semaines, qui se composent de 2 semaines (pour le passage des phases de prétest et post-test) et 8 semaines d'entraînement. Par contre, il est essentiel de noter que les exercices perceptifs sont toujours liés à une situation composée d'une compétence technique, comme la prise de balle, le plongeon, ...

Résultats et discussion. On observe que la moyenne du groupe est supérieure à 50% de réussite sur les trois tests respectivement lors des prétests (64,1%, 60,3%; 57,1%) et des post-tests (66,4%, 77,7%, 63,5%). Alors que le test statistique de Wilcoxon ne révèle aucune évolution pour le groupe des sédentaires (45,1%, 57,4%, 50%), il montre que la plupart des sujets sportifs améliorent avec l'entraînement perceptif, leurs performances de manière significative ($p < 0,05$) sur les tests 2 et 3. La progression est spécifique de l'ordre de 17,4% pour

le test 2 et 6,4% pour le test 3, mais non conséquente (2,32%) pour le test 1. Le test U de Mann-Whitney démontre des différences significatives prétests et post-tests pour T1 et T2 ($p < 0,01$) et T3 ($p < 0,05$) qui s'accroissent. Il convient d'examiner avec plus de précision les mécanismes qui permettent de réaliser de meilleures performances perceptivo cognitives afin de connaître les mécanismes anticipatoires spécifiques au gardien. Ces capacités à encoder, extraire et reconnaître les informations spécifiques pour anticiper sont dues aux structures complexes et discriminantes de la mémoire de long terme, mais aussi au contrôle des mouvements oculaires vers des sources essentielles qu'il convient de déterminer (Williams, 2000⁵²⁸). En effet même si les experts et les novices ne diffèrent pas par leur acuité de base, ils pourraient se distinguer par leur capacité à mieux centrer leur attention sélective ce qui doit commencer dès le plus jeune âge chez le gardien par la pratique régulière d'exercices moteurs et proprioceptifs associés à des tâches d'attention de base.

5) Équilibre et force bipédique chez le footballeur

Mots clefs : équilibre, saut vertical

Introduction. Chez l'enfant, l'adolescent, mais aussi l'adulte, il devrait être courant avant toute pratique sportive de mesurer de manière répétée avec des tests simples et rapides, la répartition de la masse corporelle sur les deux pieds (Md, Mg), les caractéristiques spatiales et temporelles des centres de pression respectifs (Cpd, Cpg), mais aussi résultant (Cpr) selon une logique responsable de préventions des blessures conséquentes de déséquilibres. En effet, on relève logiquement que la pratique intensive du football augmente le risque de blessure d'autant plus si les sujets présentent des déséquilibres posturaux (Hrysomallis 2011⁵²⁹ ; Teixeira et coll., 2011⁵³⁰) et/ou musculaires (Croisier et coll., 2008⁵³¹ ; Lehance et coll., 2009⁵³²). En moyenne, un joueur de football élite souffre de 1,5 à 7,6 blessures, toutes les 1000 heures d'entraînement et 12-35 blessures chaque 1000 heures de match (Longo et coll., 2012⁵³³). L'objectif de cette

⁵²⁸ Williams AM. Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 18(9): 737-50.

⁵²⁹ Hrysomallis C. Balance ability and athletic performance. *Sports Medicine*, 2011, 41(3) : 221-32.

⁵³⁰ Teixeira L., de Oliveira D., Romano R., Correa S. Leg preference and interlateral asymmetry of balance stability in soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2011, 82(1): 21-7.

⁵³¹ Croisier J.L., Ganteaume S., Binet J., Genty M., Ferret J.M. Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: a prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 2008, 36(8): 1469-75.

⁵³² Lehance C., Binet J., Bury T., Croisier J.L. Muscular strength, functional performances and injury risk in professional and junior elite soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2009, 19(2): 243-51.

⁵³³ Longo UG, Loppini M, Cavagnino R, Maffulli N, Denaro V. Musculoskeletal problems in soccer players: current concepts. *Clinical Cases in mineral and bone metabolism*, 2012, 9(2): 107-11.

étude est de localiser avec des tests simples et rapides l'existence de différences significatives, entre les paramètres cinématiques et dynamiques des centres de pression des pieds lors du maintien d'une posture orthostatique classique, mais aussi entre les forces des membres inférieurs au cours de sauts verticaux.

Matériel et méthode. 50 étudiants (19,2±1,7 ans, 71,8±8,3 kg, 179,3±0,1 cm) pratiquants depuis plus de 10 ans le football de manière intensive effectuent après une pesée simultanément sur 2 pèse-personnes, 3 essais de 32 s en position normalisée de maintien orthostatique, espacés de 15 s de repos, à une fréquence d'acquisition de 64 Hz sur un système d'acquisition composé de 2 capteurs à 6 axes placés sous chacun des pieds. Tout en permettant la réalisation spécifique et simultanée de statokinésigrammes pour chaque pied, après filtrage des données, les surfaces couvertes, les distances parcourues et les vitesses des Cpd, Cpg et Cpr sont calculées (Winter, 1996)⁵³⁴.

Les sujets effectuent aussi lors d'un enregistrement d'une minute, 3 sauts maximaux en contre mouvement (flexion-extension) entrecoupés de 15'' de relâchement. Des équations spécifiques permettent depuis la force verticale F_z enregistrée de calculer lors des sauts, la détente verticale H_{\max} et les puissances mécaniques moyennes et de pics P_z des deux membres inférieurs. En effet, la détente verticale se calcule en utilisant l'intégration numérique de la force verticale F_z pour obtenir la vitesse de décollage.

$$V_d = \frac{1}{m} \int_{t=\text{début}}^{t=\text{décollage}} (F_z(t) - mg) dt \quad H_{\max} = \frac{V_d^2}{2g}$$

(H_{\max} = hauteur maximale du centre de gravité (m), V_d = la vitesse verticale au décollage (m.s-1), et g = constante de gravitation (9.81 m.s⁻²). La puissance mécanique de chaque essai est obtenue en multipliant la force verticale F_z par la vitesse verticale V_z .

Résultats et Discussion. La différence de répartition de la masse sur les deux pieds correspond en moyenne à 2,2±2 kg, sans pied préférentiel déterminé pour le groupe de sujets (23 pg 2,4±2,6 kg ; 24 pd 1,6±1,6 kg ; 3 aucune différence). Les variables des centres de

⁵³⁴ Winter DA, Prince F, Frank JS, Powell C, Zabjek KF. Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 1996, 75(6) : 2334-43.

pression (Cpd, Cpg) indiquent différentes stratégies motrices podales. Il existe des corrélations entre l'appui où la masse est la plus élevée et les valeurs maximales de vitesses et de distances du Cp, mais aussi de la force développée lors de l'impulsion. 90% des joueurs qui présentaient un écart de 3 kg ou plus, avaient subi des blessures. L'analyse dissociée sur deux appuis est fondamentale pour localiser des déséquilibres posturaux, mais aussi musculaires dont les limites critiques et pathologiques restent à déterminer. La diminution du coût énergétique régulateur de ces différences aux origines complexes reste un objectif à atteindre peut-être à partir d'exercices d'équilibres proprioceptifs, de renforcements musculaires et d'approches biomédicales spécifiques.

6) Le plaisir dans la pratique du football source de bien-être. Pour un jeu responsable !

Mots clefs : football, jeu, plaisir.

Introduction. Au regard d'autres sports, « le football semble représenter le jeu par excellence » (Evrard, 2006)⁵³⁵. Jean Giraudoux (1927)⁵³⁶ le considère « plus encore que le roi des sports, le football est le roi des jeux ». Dans la pratique du jeu sportif, le plaisir émerge et le bien-être insoupçonné s'installe sur l'émotion créative collective, instinctive, continue, dynamique de l'imaginaire (Jeu, 1977)⁵³⁷. L'objectif de cette étude est de percevoir les relations existant entre la sensation de bien-être et le type de motivation dans la pratique du football sur une population d'étudiants.

Méthode. Nous avons choisi d'utiliser le questionnaire constitué de 23 items de l'article de Antoine et coll., (2007)⁵³⁸ sur l'évaluation du bien-être subjectif (Tableau 1. ÉBES-23). Une autre série de 28 questions portant sur la mesure de motivation intrinsèque, extrinsèque et d'amotivation en contexte sportif selon l'échelle de motivation dans les sports (Tableau 2.

⁵³⁵ Evrard F. *Dictionnaire passionné du football*. Paris : Presses universitaires de France, 2006.

⁵³⁶ Giraudoux J. *Préface à l'anthologie La Gloire du football. Recueil des meilleures pages sur le football*. Paris : éditeur Fernand Aubier, 1927.

⁵³⁷ Jeu B. *Le sport, l'émotion, l'espace : essai sur la classification des sports et ses rapports avec la pensée mythique*. Paris : Édition Vigot, 1977.

⁵³⁸ Antoine P., Poinot R., Congard A. Évaluer le bien-être subjectif : la place des émotions dans les psychothérapies positives. *Journal de thérapie comportementale et cognitive*, 2007, 17(4) : 170-180.

ÉMS-28) de Brière et coll., (1995)⁵³⁹ est exploitée. 91 étudiants optionnaires football (19,5±1,4 ans) ont répondu aux 2 questionnaires selon un ordre randomisé.

Résultats. L'ÉBES-23 met en évidence les items maximaux « bonheur, joie et gaieté » choisis en prédilection (5,63±1,32) au détriment des éléments « cafard, morosité » (1,93±1,12). La ÉMS-28 confirme le choix de la pratique du football par motivation intrinsèque de stimulation par l'intermédiaire des valeurs élevées (5,94±1,09) des variables corrélées au plaisir, à l'excitation du jeu. Les matrices de corrélations au sein et entre chacun des questionnaires soulignent l'influence déterminante de l'amusement et de la quête du bien-être.

Discussion. Les étudiants choisissent et pratiquent le football par motivation intrinsèque de stimulation, mais aussi d'accomplissement (5,23) et de connaissance (4,15) dans le but de ressentir des sensations de plaisir. Le bien-être trouve une de ses sources fondatrices dans l'aventure du plaisir du jeu, cependant structuré sur les plans culturels et anthropotechniques. Pour un enseignement efficace responsable, la majeure difficulté reste de transmettre le contenu de formation en adéquation aux attentes motivationnelles des étudiants.

⁵³⁹ Brière N., Vallerand, R., Blais, M., Pelletier, L. Développement et validation d'une mesure de motivation intrinsèque, extrinsèque et d'amotivation en contexte sportif : l'Échelle de Motivation dans les Sports (EMS). *International Journal of Sport Psychology*, 1995, 26 : 465-489.

Partie IV. Chapitre 4. Thématiques de recherche sur le football

En général pourquoi pratiques-tu ce sport?		1	2	3	4	5	6	7	Moyenne	Ecart-type
1	Pour le plaisir de découvrir de nouvelles techniques d'entraînement.								4,02	1,23
2	Parce que cela me permet d'être bien vu-e par les gens que je connais.								1,69	1,11
3	Parce que selon moi, c'est une des meilleures façons de rencontrer du monde.								3,09	1,43
4	Je ne le sais pas; j'ai l'impression que c'est inutile de continuer à faire ce sport.								1,32	0,86
5	Parce que, je ressens beaucoup de satisfaction personnelle pendant que je maîtrise certaines techniques.								5,37	1,09
6	Parce qu'il faut absolument faire du sport si l'on veut être en forme.								4,59	1,74
7	Parce que, j'adore les moments amusants que je vis lorsque je fais du football.								6,03	1,04
8	Pour le prestige d'être un-e athlète.								3,08	1,74
9	Parce que c'est un des bons moyens que j'ai choisi pour développer d'autres aspects de ma personne.								3,79	1,54
10	Pour le plaisir que je ressens lorsque j'améliore certains de mes points faibles.								5,25	1,23
11	Pour le plaisir d'approfondir mes connaissances sur différentes méthodes d'entraînement.								4,33	1,50
12	Pour l'excitation que je ressens lorsque je suis vraiment "embarqué-é" dans l'activité.								5,76	1,16
13	Il faut absolument que je fasse du sport pour me sentir bien dans ma peau.								5,28	1,53
14	Je n'arrive pas à voir pourquoi je fais du sport; plus j'y pense, plus j'ai le goût de lâcher le milieu sportif.								1,20	0,58
15	Pour la satisfaction que j'éprouve lorsque je perfectionne mes habiletés.								5,18	1,30
16	Parce que c'est bien vu des gens autour de moi d'être en forme.								2,39	1,67
17	Parce que pour moi, c'est très plaisant de découvrir de nouvelles méthodes d'entraînement.								4,01	1,46
18	C'est un bon moyen pour apprendre de nombreuses choses qui peuvent m'être utiles dans d'autres domaines de ma vie.								4,21	1,50
19	Pour les émotions intenses que je ressens à faire un sport que j'aime.								6,03	1,07
20	Je ne le sais pas clairement; de plus, je ne crois pas être vraiment à ma place dans le sport.								1,15	0,51
21	Parce que, je me sentrais mal si je ne prenais pas le temps d'en faire.								4,87	1,61
22	Pour le plaisir que je ressens lorsque j'exécute certains mouvements difficiles.								5,15	1,26
23	Pour montrer aux autres à quel point je suis bon-ne dans mon sport.								3,22	1,61
24	Pour le plaisir que je ressens lorsque j'apprends des techniques d'entraînement que je n'avais jamais essayées.								4,24	1,21
25	Parce que c'est une des meilleures façons d'entretenir de bonnes relations avec mes amis-es.								3,70	1,67
26	Parce que j'aime le "feeling" de me sentir "plongé-é" dans l'activité.								5,03	1,41
27	Parce qu'il faut que je fasse du sport régulièrement.								4,93	1,53
28	Je me le demande bien; je n'arrive pas à atteindre les objectifs que je me fixe.								1,55	0,98

Tableau 7. ÉMS-28.

	1	2	3	4	5	6	7	Moyenne	Ecart-type
ATTACHEMENT								4,58	1,52
INQUIÉTUDE								3,39	1,46
AGACEMENT								3,69	1,47
SATISFACTION								4,98	1,20
GÈNE								2,47	1,47
CAFARD								1,92	1,14
AFFECTION								4,87	1,63
PEUR								2,69	1,27
COLÈRE								3,12	1,32
BONHEUR								5,48	1,34
REGRET								2,86	1,69
TRISTESSE								2,27	1,24
AMOUR								4,99	2,01
ANGOISSE								2,47	1,45
IRRITATION								2,24	1,30
JOIE								5,77	1,25
EMBARRAS								2,43	1,35
MOROSITÉ								1,95	1,07
CRAINTE								2,67	1,33
MÉCONTENTEMENT								3,59	1,33
GAÏETÉ								5,67	1,37
CULPABILITÉ								2,24	1,37
MÉLANCOLIE								2,18	1,40

Tableau 8. ÉBES-23.

Conclusion (4)

Cette quatrième partie est un éventail de quelques recherches regroupées en thématiques révélant ce qu'il serait finalement possible de développer dans le temps, sur l'haltérophilie et la musculation, le saut vertical, la locomotion à roues, la posturologie, le football et autres.

Concernant l'haltérophilie cette dernière doit être marquée par les approches physiologiques, neurophysiologiques et ergonomiques associées à la biomécanique. Lors du tirage à l'arraché, comme à l'épaulé, nous évoquons des boucles sémiophysiques énergétiques conséquentes d'un ralentissement du système haltérophile – barre dues à un repositionnement articulaire des membres inférieurs, du bassin, mais aussi du dos et des épaules. Mais, il serait intéressant d'analyser ces boucles sur le plan physiologique notamment électromyographique afin d'interpréter ce ralentissement comme une nécessité physiologique permettant d'accumuler de l'énergie pour la restituer enfin de tirage. Dans un premier temps, utiliser cette configuration bouclée, force – vitesse sur des sauts verticaux afin d'établir des adéquations entre les signaux électromyographiques, les surfaces des boucles et la performance en saut vertical. Pour cela, utiliser une, puis deux plateformes de forces, pour différencier les appuis droite et gauche. Associer cette appréciation des paramètres de la force générée distinctivement avec ceux de l'équilibre postural. Il convient dans le saut vertical de procéder à une analyse tridimensionnelle des centres de masse des différents segments anatomique afin de convenablement calculer le déplacement du centre de gravité depuis l'utilisation du théorème de l'énergie cinétique selon la méthode de Mouahid (1992)⁵⁴⁰. Cette méthode, une fois maîtrisée sur le saut vertical, l'appliquer sur le système haltérophile – barre comme réalisée par Attia en 1997⁵⁴¹. Certaines études très intéressantes se sont centrées sur la représentation mentale de l'haltérophile avant le décollage de la barre, mais ce qu'il conviendrait de généraliser ce sont des entraînements depuis l'utilisation de feedbacks sonores traduisant la cinématique de la barre (trajectoires, vitesses, accélérations, etc.) en relation avec les coordinations segmentaires. L'enseignement de l'haltérophilie doit se généraliser dans une propédeutique préventive à la manutention de charges chez les enfants, adolescents et adultes, comme une discipline support à l'apprentissage des principes ergonomiques de bases (logique sur l'ergomotricité de

⁵⁴⁰ Mouahid A. *Analyse dynamique et cinématique des sauts verticaux*. Poitiers : thèse en sciences biologiques et fondamentales appliquées. Psychologie, 1992.

⁵⁴¹ Attia A. *À propos du renforcement musculaire - analyse mécanique de techniques de soulevés de charge*. Université de Poitiers, thèse de mécanique et physiologie de l'entraînement, 1997.

Partie IV. Conclusion

Gendrier⁵⁴². Sur le plan de l'histoire des sciences et des techniques appréhender les changements techniques selon l'apparition de nouveaux matériels, mais aussi selon les procédés d'entraînement liés aux notions de pliométrie, d'explosivité, de raideur musculaire, etc.

Le catalogue des brevets d'invention révèle la dynamique de la recherche sur les systèmes de pédaaliers, manivelles, pédales pour optimiser le déplacement en bicyclette, tricycle et autres engins. Dans la perspective du retrait progressif des voitures des centres urbains, il convient de penser à l'analyse des engins électriques (trotinette, gyropode, monocycle), mais surtout mécaniques susceptibles de pallier cet inconvénient tout en accordant des sources de récréativité et de liberté sportive et économique par rapport aux transports en communs actuels. C'est un univers où l'historien des sciences peut consacrer son axe de recherche en ayant l'espoir de mises en applications dans le sport, le domaine de la rééducation, mais aussi l'univers touristique.

Les problématiques de recherche sur l'optimisation des postures et des équilibres chez les sportifs représentent l'étape initiale à toute autre étude pour optimiser les mouvements et les déplacements, car c'est de la qualité de la stabilité des points, des zones d'appuis que les leviers exercent résistances et forces. L'approche par la cinématique et la dynamique des déplacements des centres de pression pied droit et gauche en relation avec le centre de gravité du corps se révèle riche d'enseignements à approfondir, dans la détermination des caractéristiques et des rôles respectifs de chaque pied. Aujourd'hui, il faut coupler ce types d'études avec des parcours et des paysages de réalité virtuelle, où les sujets sont confrontés à du traitement de l'information tout en exécutant différentes tâches motrices avec des intensités d'efforts multiples.

Concernant les dernières études évoquées sur le football ; tout comme l'haltérophilie peut servir de discipline favorisant l'apprentissage des principes ergonomiques, la pratique du football doit être un sport support à l'approfondissement de l'étude du plaisir, de l'hédonisme, des relations sociales chez les pratiquants. Par rapport aux tensions sociales de plus en plus virulentes comment ce sport, le plus pratiqué au monde, peut arriver à atténuer les conflits, favoriser la paix sociale dans le quartier, la ville, le pays et entre les nations (Projets éducatifs FIFA). Sur le plan de l'optimisation de la performance en football, l'amélioration de la perception et du traitement visuel en relation avec la technique individuelle et collective devrait devenir notre domaine favori d'étude.

⁵⁴² Gendrier M. *Gestes et mouvements justes*. Les Ulis : EDP Sciences, 2004. / Gendrier M. *L'ergomotricité : le corps, le travail et la santé*. Grenoble : Presses universitaires de Grenoble, 1995.

Partie IV. Conclusion

L'ensemble de ces futures recherches devrait d'appuyer sur la configuration de structures sémiophysiques, sans doute plus complexes en trois dimensions permettant de visualiser l'interaction d'un grand nombre de variables. La théorie des catastrophes qui est comme le notait Thom (1990) principalement « *un langage, une méthode, qui permet de classifier, de systématiser les données empiriques, et qui offre à ces phénomènes un début d'explication qui les rend intelligibles* »⁵⁴³ peut servir dans sa vulgarisation à expliciter de manière originale ces sémiophysiques. Il conviendrait d'approfondir sa compréhension pour son utilisation, car elle s'efforce de décrire les discontinuités qui peuvent se présenter dans l'évolution d'un système. Elle étudie l'évolution globale des systèmes qui peuvent se présenter comme une succession d'évolutions continues séparées par des sauts brusques de nature qualitativement différents. Elle vise à interpréter les nuages de points recueillis expérimentalement, grâce à des constructions mathématiques. En fait, comme le soulignait Thom, en 1983, « *toute la théorie des catastrophes, son schéma général, tient justement à ceci : il s'agit d'une théorie herméneutique qui s'efforce, face à n'importe quelle donnée expérimentale, de construire l'objet mathématique le plus simple qui puisse l'engendrer* »⁵⁴⁴.

Les mouvements étudiés à haute fréquence d'acquisition (tirage à l'arraché, pédalage, équilibre, déplacement de joueur lors d'un match...) constituent des systèmes cinématiques et dynamiques qui possèdent des points d'instabilité, des points critiques en rupture ou pas avec la continuité du mouvement où une simple modification de l'espace-temps peut entraîner en réaction en chaîne avec d'énormes conséquences sur la réussite ou l'échec d'un mouvement technique, d'un système de jeu ou méthode d'analyse. L'équilibre du système haltérophile - barre après la réception de la barre, le décalage des points morts hauts et bas lors du pédalage selon le type de pédalier ou la force exercée sur les pédales, la tension excessive sur les avant-bras alors que les mains agrippent le wishbone selon le diamètre imposé, le cheminement du centre de pression sous chaque pied en position d'équilibre orthostatique, la tension entre joueurs au sein des équipes... mais aussi l'utilisation d'un système de compréhension en histoire et épistémologie des sciences et des techniques peuvent se prêter à une analyse de type catastrophique. Ces principales idées constitueront la trame de mes recherches sur les plus de dix années d'enseignement et de recherche qui me restent à effectuer.

⁵⁴³ Thom R. *Apologie du logos*. Paris : Editions Hachette, 1990, p. 336.

⁵⁴⁴ Thom R. *Paraboles et catastrophes*. Paris : Editions Flammarion, 1983.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La curiosité au sujet de la compréhension du mouvement et de la locomotion est à l'origine de nombreuses études en physiologie et en biomécanique. Cet intérêt n'a pas de limite, car plus la connaissance des phénomènes de la vie s'enrichit, plus la conscience de la faible étendue de nos savoirs et leurs limites, sur les systèmes physiologiques s'accroît. La performance compétitive essentielle, presque fondamentale de l'homme se révèle celle de vivre le plus longtemps et le mieux possible. Tout ce qui permet d'appréhender cette qualité de la vie, reste primordial.

Dans le cadre de ce bilan, d'une étape de carrière, sur la thématique de la technologie envisagée comme une source possible d'optimisation du mouvement, l'histoire des interprétations des mouvements et des locomotions qu'elles soient initialement animales par nécessité sociale permet d'établir des filiations avec celles de l'homme. En effet, il était à une époque de notre histoire impossible d'expérimenter sur l'homme, ou même d'émettre, des hypothèses qui iraient à l'encontre des supposées religieuses et divines. Le patrimoine de ces études se révèle d'autant plus intéressant, qu'il complète celui de l'homme. En effet, les études entre autres de Borelli, Marey, Pettigrew, McNeill Alexander, qui abordent le mouvement animal, enseignent aussi sur les processus physiologiques propres à l'homme, étant donné que ce dernier partage avec les autres espèces animales, les mêmes processus physiologiques fondamentaux.

Finalement la problématique de « la vie », dans toute sa complexité, transparait aussi bien chez l'animal que chez l'homme, dans la combinaison d'un ensemble de lois physiques et chimiques qui maintient cet état et son évolution. Les préoccupations de performances repoussent les limites interprétatives de celles de la vie. Courir plus vite informe sur les possibilités de faire plus de choses en une durée de vie plus courte. Il s'agit de déplacement dans un premier temps, mais aussi d'autres activités multiples. La force latente à l'efficacité de ce système, exprime par la combinaison un travail, une puissance plus élevée. La compréhension des facteurs et systèmes, associés à l'évolution des performances sportives repousse les limites de celle de la vie.

Cette synthèse explore les processus technologiques théoriques et pratiques qui permettent la compréhension du mouvement selon une analyse historique épistémologique. En effet, l'évolution des concepts et des théories révèle dans la continuité de la longue durée, certaines relations, filiations. Les auteurs prépondérants

Conclusion générale

traités explicitent le développement de certains cheminements scientifiques prépondérants.

On pense à l'étude du centre de gravité dans les locomotions qui pourrait constituer une trame de recherche historique et épistémologique très intéressante, on l'évoque plus qu'on ne le traite, cela reste à faire, mais principalement dans les techniques corporelles et en relation avec les procédés techniques et les avancées technologiques pour mesurer son déplacement, sa trajectoire. En effet, depuis *Le traité des corps flottants* d'Archimède, avec son fameux théorème d'hydrostatique sur l'allègement d'un corps plongé dans un liquide, mais aussi l'étude intitulée *De l'équilibre des plans ou des centres de gravité des plans* la problématique du centre de gravité sur les corps rigides⁵⁴⁵ suit son cheminement, sa localisation précise chez l'animal et l'homme par calcul pose toujours problème malgré l'aide technologique et la précision faisant. La mesure des segments, des masses et le positionnement des centres de masse des différents segments corporels respectifs intervenant dans les calculs reste toujours de l'ordre de l'appréciation.

Dans ce cadre d'analyse des filiations technologiques théoriques et pratiques, l'œuvre de Giovanni Alfonso Borelli est très importante, car elle établit depuis l'interprétation des mouvements et des locomotions, une transition de connaissance, notamment sur la manière d'aborder le calcul du mouvement, entre les auteurs anciens, les contemporains de Galilée et ceux de Newton.

Les concepts mathématiques et les lois physiques utilisés pendant ces périodes génèrent différents outils et techniques qui conditionnent des interprétations différentes du mouvement. On pense à l'utilisation des notions physique de force, de travail, de puissance, d'énergie dans l'analyse du mouvement. L'histoire de l'évolution de cette iatro-mathématique et iatro-mécanique appliquée au mouvement animal et humain jusqu'à la biomécanique de nos jours reste à établir.

L'œuvre *De motu animalium* semble, non pas essentielle pour ce qu'elle dit, mais plutôt pour ce qu'elle suggère par ses figures associées à certaines formes de calculs et représentations de problématiques anatomo-physiologiques. L'objet de l'épistémologie qui est d'étudier la marche de la science et les conditions de la découverte scientifique,

⁵⁴⁵ Milhaud G. *Nouvelles études sur l'histoire de la pensée scientifique*. Paris : F. Alcan, 1911.

Conclusion générale

donne du sens au cheminement des interprétations de ce travail dans un continuum de sources historiques diverses.

Nous avons essayé de suivre certaines de ces trajectoires avec « *l'état d'esprit du chercheur* »⁵⁴⁶ qui souhaite trouver et analyser des correspondances historiques et épistémologiques dans les méthodes d'analyse du mouvement. Le travail développé s'organise autour de cette ligne de conduite pour faire émerger dans l'étude de textes fondamentaux sur la « physiologie physico-mathématique », les éléments scientifiques qui participent à l'évolution historique et conceptuelle des théories sur la compréhension de la locomotion.

L'unité des sciences et particulièrement de la biologie se situe dans la connaissance de leurs histoires, finalement de l'*Histoire*, qui permet d'assister aux origines des idées, des concepts, des théories, des lois, des règles les plus générales, des principes fondamentaux où les hommes savants les évoquent par le truchement de cheminements de pensées inconnus. Il est intéressant de connaître la biographie de ces précurseurs pour imaginer la logique de ces genèses d'évolutions et espérer d'autres progrès scientifiques. L'histoire essaye d'expliquer ces hommes par leur langage, leur pensée, leur enseignement, l'universalité de certaines notions. L'élaboration des différents contextes sémantiques conséquents « motu », âmes et esprits, « économie » enfin le substantif locomotion apparu à la fin du XVIII^e siècle dévoile ce vaste champ sur les recherches de la connaissance des êtres vivants, dont l'homme. Mais ces empreintes sont souvent des mystères difficiles à déchiffrer de par leur complexité.

Concernant l'histoire de la physiologie et plus spécifiquement du mouvement, développée dans cette étude, les différentes parties exposent l'émergence d'une certaine logique du temps, dans l'approche du réel. Non pas le temps de la science qui « *compte des instants, note des simultanéités, mais reste sans prise sur ce qui se passe dans les intervalles* »⁵⁴⁷, comme l'écrivait Henri Bergson, mais un temps qui inclut la durée, la « *continuation de ce qui n'est plus dans ce qui est* »⁵⁴⁸. Un temps qui n'hésite pas à mêler les instants successifs, sûr que la logique de la continuité nous invite à dépasser le pont aux ânes de la succession, afin de mieux comprendre le réel. L'histoire des sciences dans l'exploration des multiples traces qui constituent la science de l'étude du mouvement représente un

⁵⁴⁶ Gennes P.-G. *Leçon inaugurale au collège de France. Physique de la matière condensée*. Paris : Collège de France, 10 novembre 1971.

⁵⁴⁷ Bergson H. *Durée et simultanéité. À propos de la théorie d'Einstein*. Paris : Félix Alcan, 1922, p. 51.

⁵⁴⁸ *ibid.*, p. 45.

Conclusion générale

cheminement fondamental pour montrer comment les idées se créent, se développent ou périssent, révélant ainsi que la science est en perpétuelle construction. On pense à la disparition de certains tests physiologiques et leurs paramètres physiologiques associés qui servaient à une époque pour apprécier la condition physique et qui s'effacent progressivement par leurs limites trouvées, du patrimoine scientifique (test de Ruffier Dickson⁵⁴⁹, test de Cooper, test de Sargent, équation de calcul de puissance de Lewis, les notions seuils lactiques...)

L'étude historique des théories explicatives de la locomotion, montre que sur près de deux mille cinq cents ans, l'analyse du mouvement de l'animal et de l'homme s'est améliorée par assimilations, rejets ou transformations des idées, des concepts ou des méthodes des prédécesseurs. On note que les préoccupations des précurseurs évoqués, furent reprises au cours des siècles sous l'influence des développements technologiques et des modèles disciplinaires impliqués directement ou secondairement, par l'anatomie fonctionnelle, la mécanique, la biologie, la médecine puis l'ingénierie pour les principaux axes.

En effet, certains aspects de la biologie aristotélicienne demeurent encore actuels, tant du point de vue de la méthode d'analyse des questions problèmes et des concepts, que de celui des interprétations. Les solutions présentées, souvent multidisciplinaires, en général soigneusement démontrées, expriment des raisonnements souvent corrects et ingénieux, étant donné les faits alors connus. Observateur et investigateur infatigables, Aristote peut être considéré à la fois comme le premier encyclopédiste et le fondateur érudit d'une systématique zoologique basée déjà sur des principes de l'anatomie comparée. Il a abordé, non seulement les problèmes concevables de son temps, mais aussi ceux qui préoccupent la science contemporaine.

L'histoire ultérieure de la science a montré que le *De motu animalium* d'Aristote, celui de Borelli et de bien d'autres auteurs savants, avant et après lui, restent incomplets à bien des égards. Mais pour formuler un jugement équitable, il convient de positionner dans le contexte historique et scientifique de l'époque, ces personnages érudits qui ont frayé le chemin. Parfois en franchissant les périodes historiques sans que les successeurs n'ajoutent rien à ce qu'ils avaient dit. Quand l'analyse humaine est revenue à la science méthodique et à l'observation de la nature, elle n'a pu que continuer la route que ces

⁵⁴⁹ Levavasseur G. *Intérêt, rôle et limites du test de Ruffier Dickson à partir de l'étude de 173 sportifs*. Rouen : Thèse de médecine, 2000.

Conclusion générale

savants et philosophes avaient défrichée. On a considérablement tardé à suivre le raisonnement d'Aristote sur la question de la locomotion animale, le considérant comme subalterne par rapport à d'autres problèmes biologiques. Cette interruption a été plus importante encore que pour l'*Histoire des Animaux*, ou pour le *Traité des Parties*...

La locomotion s'exprime selon la forme générale du mouvement, en intégrant dans le déplacement, l'aisance, la vitesse, la puissance des plus avancés, mais aussi la difficulté, la lenteur, la fragilité des espèces en danger. Elle divulgue dans un processus fondamental de distinction, une multitude de variétés de conceptions mécaniques et physiologiques extrêmement efficaces, qui laisse prévoir l'évolution vers la plus adaptée ou la détérioration synonyme de récession jusqu'à la disparition. On observe des thèmes communs sur les manières avec lesquelles les animaux font face avec succès ou pas, aux propriétés difficiles et parfois hostiles de l'environnement physique donné, à travers la diversité des formes de vie et des modes locomoteurs variables. On trouve des constantes morphologiques, des rapports dont les significations peuvent servir à améliorer et à prolonger la vie de l'homme.

Cette synthèse essaye d'exposer quelques jalons sur certains auteurs représentatifs dans le domaine de l'étude de la locomotion. On devrait situer et comparer leurs explications, leurs opinions théoriques, par rapport à la logique et la chronologie d'écriture de leurs œuvres complètes. La durée de l'analyse constitue un facteur limitant, mais des étapes de pensées spécifiques, propres à des périodes historiques s'établissent. C'est le cheminement d'une histoire conceptuelle, que les extraits de textes choisis et les œuvres sous-entendues se proposent de mettre en évidence. Dans ce catalogue des constructeurs du savoir physiologique plus spécifiquement sous l'angle mécanique, l'œuvre de Giovanni Alfonso Borelli et notamment celle du *De motu animalium*, marque la concrétisation puis la synthèse de l'investissement de toute une vie. Elle indique une passerelle entre la physiologie et la mathématique, mais aussi la mécanique et l'astronomie, une jonction entre des générations de connaissances passées et les perspectives de travaux et de découvertes futures. La question de l'agencement de l'équilibre, de l'appui, de la force dans marche est un problème classique d'histoire naturelle, que Borelli a traité géométriquement et reformulé en celui de mouvement des animaux. La philosophie de Descartes avait ouvert des perspectives dans l'application des mathématiques à l'étude du mouvement des corps. Galilée, présenté comme le père de la mécanique expérimentale dans ce domaine, fera figure de pionnier, il devait par ailleurs réaliser un traité sur la locomotion. Borelli, autre savant italien, élève de Benedetto Castelli dans cette continuité, décrira le système musculo-squelettique à partir

Conclusion générale

d'un modèle mécanique de leviers, de poulies, de cordes qui permettront d'émettre plusieurs hypothèses concrétisées, notamment celle de la source de la contraction des muscles qui serait dans les fibres musculaires elles-mêmes.

Cependant, bien qu'axée sur une science exacte à savoir la mécanique mathématique rationnelle, l'analyse du mouvement d'hier comme d'aujourd'hui, manque de précision sur bien des points notamment la mesure exacte du déplacement des segments et la position précise des centres de masse de ces segments qui vont servir aux calculs de puissance et d'énergie cinétique. Mais surtout et encore les forces exactes des muscles et quantum d'intervention de chaque muscle dans un groupe synergique, tout comme la mesure quantitative et qualitative de l'interaction entre les différents appareils osseux, articulaire et musculaire qui restent encore à définir, pour modélisation... Par l'exemple le travail synthétique de Allard et al. (2011) sur l'analyse du mouvement humain par la biomécanique, révèle les indispensables prises de positions des chercheurs l'étudier. En effet, depuis le choix et le calibrage des instruments de mesures concernant les systèmes de mesure cinématiques, dynamiques, électromyographiques, mais aussi les techniques de filtrages et de lissages de données, pour expliciter les notions de déplacement, de vitesse, d'accélération, les limites existent à tous les niveaux. D'autant plus que les erreurs s'amplifient dans les interactions explicatives des gestes techniques, des coordinations motrices en faisant intervenir les notions de travail, de puissance, d'énergie... En effet, la dernière partie de notre synthèse, consacrait à la présentation de quelques études se situe dans ce cadre depuis uniquement la notion de groupe de participants qui sera et restera toujours hétérogène, et ce malgré le nombre, car tout individu est unique quelle que soit sa discipline sportive.

L'étude a suivi le cheminement historique de l'exploration du mouvement, dans des œuvres de plusieurs auteurs à différentes périodes de l'évolution de la mécanique et de l'anatomie fonctionnelle, se complétant l'une l'autre. Maintenant, la littérature spécialisée désigne cette catégorie de recherches par les termes fréquemment employés de mécanique ou mécanisme des muscles et des articulations, analyse du mouvement, kinésiologie ou cinésiologie et enfin biomécanique. La maîtrise de ces deux matières, mécanique et anatomie fonctionnelle mènent à la considération d'un aspect du mouvement ; celui de rechercher tous les phénomènes mécaniques gravifiques et musculaires qui président à la réalisation d'un mouvement, c'est-à-dire élucider le jeu des forces agonistes et antagonistes qui lui donne sa direction, sa puissance et son énergie.

Conclusion générale

Sur un autre aspect, les limites de cette synthèse sont nombreuses, car l'interprétation d'une œuvre se fait par rapport à l'intégralité des recherches publiées ou suggérées par l'auteur. Mais aussi, selon les événements qui structurent sa biographie, le contexte de l'époque, l'opinion interprétative des savants, le décalage latent entre ce que l'auteur pense et écrit ou dit, mais aussi celle du lecteur. Bref, lorsqu'il y a comparaison entre plusieurs œuvres les difficultés comme les risques de confusions se démultiplient. Par exemple, il reste difficile de traiter le *De motu animalium* d'Aristote sans connaître *Le Traité de l'âme*, *Les petits traités d'histoire naturelle* voir *La Physique* ; il en est de même de l'interprétation de la contraction musculaire dans la première partie du *De motu animalium* de Borelli, sans étudier et faire référence à la seconde partie physiologique, mais aussi aux introductions de l'œuvre *De vi percussiois liber* (1667) et *De motionibus naturalibus à gravitate pendentibus liber* (1670) comme le souligne l'auteur ; la vision complète reste tronquée. D'autre part, la connaissance des auteurs sur lesquels l'auteur s'appuie pour construire son raisonnement : Euclide, Archimède, Galilée, Stevin, Torricelli... se révèle aussi nécessaire pour argumenter les critiques.

L'interprétation et l'exploitation des œuvres de ces savants, est-elle convenable ? Les analyses de Varignon, Parent, Pemberton, Hamberger, Duhem... semblent parfois dire le contraire sur les travaux de Borelli. Mais ces études critiques sont déjà dans une étape de dépassement de l'œuvre avec des instruments théoriques mieux maîtrisés ou nouveaux.

Ces quelques remarques appellent à la modestie, celle de la relativité de toute étude, qui peut se déséquilibrer par la simple connaissance d'une lettre ou missive oubliée, d'un concept, d'une théorie, de l'interprétation et la signification de mots : momentum, force, puissance, masse, poids... Quelles sont finalement les significations de ces concepts, de ces théories par rapport à notre conception actuelle, à l'interprétation de l'époque, celle de l'auteur et des auteurs théoriciens, qui déjà se confrontaient pour imposer une définition unique acceptée logiquement de tous !

Aujourd'hui, la locomotion a toujours pour finalité de propulser le corps vers l'avant, tout en l'orientant vers un but, en assurant simultanément d'autres fonctions motrices comme, le maintien de l'équilibre et de la posture de la tête et du tronc ainsi

Conclusion générale

que l'exécution des mouvements des autres segments corporels⁵⁵⁰. La définition de la locomotion^{551, 552} maintenant se précise à la croisée des champs disciplinaires biomécaniques et neurophysiologiques pour être définie comme un mouvement élaboré qui est à la fois un mouvement en rampe (nécessitant un recrutement variable d'unités motrices), un mouvement topo cinétique (orienté vers un but), un mouvement morpho cinétique (résultat d'un modèle interne dont la réalisation implique des changements fonctionnels rapides de millions de neurones), un mouvement à composantes éréismatiques (c'est-à-dire faisant intervenir un support nécessitant une coordination avec la posture) etc., mais depuis toujours, représente toujours un déplacement d'un lieu à un autre.

Comme le soulignent la plupart des ouvrages généraux récents sur l'étude du mouvement, deux approches parallèles abordent actuellement la problématique locomotrice. L'une d'inspiration biomécanique qui insiste sur le rôle que jouent le rythme du déplacement et les différentes durées de phases, les caractéristiques mécaniques des segments corporels impliqués ainsi que les forces externes. L'autre d'obédience neurophysiologique qui suppose la locomotion comme une activité automatique modulée par des réseaux de neurones pré organisés. Concernant l'étude du mouvement par la biomécanique à laquelle nous appartenons, plus par conditionnement matériel et technologique, deux parties essentielles subdivisent cette discipline principalement, la mécanique et l'anatomie fonctionnelle, qui se complètent l'une l'autre depuis toujours et en relation avec la physiologie. L'occultation ou la suppression d'une de ces composantes perturbe l'interprétation du mouvement, nous le percevons dans les compromis de certaines techniques ou le ralentissement pour le placement segmentaire, ou de l'accumulation d'énergie est indispensable afin de mieux restituer de la puissance, de l'énergie. En haltérophilie, la compréhension de la technique passe par l'intégration de ce ralentissement pour un meilleur positionnement afin d'exercer de plus importantes forces de traction sur la barre. D'autre part, il convient par exemple de toujours rapprocher la barre du centre de gravité de l'haltérophile, en minimisant les leviers, cela nécessite un léger ralentissement de tout le système haltérophile-barre. Ces compromis

⁵⁵⁰ Boisacq-Schepens N. Le contrôle moteur de la marche. *Neurochirurgie*, 1998, 44 (3), p. 158-166.

⁵⁵¹ Kemoun G. et coll. Parkinson's disease as a model of aging: prospective analysis of gait disorders ». *Revue neurologique (Paris)*, 2003, 159 (11), p. 1028-37.

⁵⁵² Kemoun G. Physiologie de la marche - particularités chez la personne âgée. Thème « La chute » *In La lettre de Médecine Physique et Réadaptation*, 2001, n° 59.

Conclusion générale

spécifiques à la technique individuelle de chaque sportif, dans tout mouvement, enrichissent les avancées technologiques, théoriques et pratiques.

Cette synthèse tend à présenter des auteurs prépondérants sur des avancées majeures de l'étude du mouvement au cours des siècles, par rapport à d'autres qui essaient de faire des synthèses. Les choix d'une œuvre restent difficiles à justifier, tout comme à l'intérieur d'une œuvre choisir un élément spécifique. Il conviendrait d'approfondir chacun d'eux pour présenter plus précisément et spécifiquement leur démarche par rapport à cette filiation, en empruntant des exemples plus conséquents, autour des notions d'équilibre, d'appuis, des calculs de force, de travail, de puissance et d'énergie. Dans la quatrième partie consacrée à l'optimisation effective de certains mouvements sportifs, nous faisons référence à ces notions. Que ce soit dans l'étude de mouvements spécifiques à l'haltérophilie comme le tirage à l'arraché, différents types de sauts ou d'autres techniques, la technologie est devenue indispensable. Les instruments de mesure comme les plateformes de forces permettent d'appréhender depuis les appuis, les équilibres, les notions de force, de puissance et d'énergie. De même, les systèmes vidéo 2D et optoélectronique 3D rapprochent après reconstruction des modèles, les figurines représentatives des calculs de Borelli. Comme sa recherche iatrophysique cherche à donner du sens par la représentation iconographique physique, la sémiophysique essaye de géométriser l'interaction des facteurs d'optimisation motrice et technique. Il y a une réactualisation par la mise à l'épreuve technologique du savoir des anciens. Les hypothèses et les résultats sont testés pour vérifier les raisonnements et essayer de trouver d'autres logiques. L'épistémologie se trouve au cœur de ce système.

Les œuvres anciennes présentées constituent des étapes dans la manière expérimentale et théorique d'envisager des solutions possibles aux problèmes de compréhension des postures, des mouvements et des locomotions. Certaines synthèses des travaux des prédécesseurs, qu'ils associent à leurs raisonnements, sont autant de sources de connaissances et des supports d'interprétations des opinions, entre les périodes historiques. Elles conduisent à dévoiler, que, confrontée à la multiplicité des animaux, à la variabilité de leurs façons de se mouvoir, évoluant dans différents milieux, la recherche de principes communs dans l'explication d'une conception de la locomotion exige une approche comparative et intégrative difficile. Cette dernière doit dépasser les caractéristiques animales d'apparences premières comme la taille, la masse, la vitesse, mais aussi la morphologie, ainsi que les barrières des milieux solides, liquides ou

Conclusion générale

gazeux. Pour élaborer des conceptions fonctionnelles communes, les savants multiplient les rapprochements et les corrélations simplificatrices sur des connaissances vérifiées comme : la taille d'un animal est un facteur critique de sa conception fonctionnelle, tout comme la nécessité de la prise en compte des dépenses énergétiques impliquant certaines dynamiques locomotrices. L'équilibre énergétique dans la mécanique locomotrice doit être discuté par exemple. Les modèles empruntés aux auteurs comme : Robert McNeill Alexander, Josef H Reichholf, et Adrian Bejan sont à poursuivre pour les dépasser ou les appliquer dans d'autres champs disciplinaires comme ce fut le cas avec le nombre de Froude, mais tout en relevant que leurs idées étaient déjà présentes chez les anciens. Concernant les activités physiques et sportives, certaines équipes de recherche s'intéressent à l'adéquation des calculs de rendement depuis des approches physiologiques et mécaniques, montrant parfois d'importantes disparités.

On pense notamment aux études de Mouahid (1992)⁵⁵³ qui révèlent les résultats approximatifs des calculs en sauts verticaux depuis le temps d'envol notamment en ce qui concerne l'énergie cinétique interne et donc des travaux des forces internes depuis l'utilisation uniquement d'une plateforme de force. Une analyse cinématique en deux dimensions permet de mieux objectiver ce calcul. Mais aussi aux études de Hambli (1997)⁵⁵⁴ qui depuis un ergocycle instrumenté mécaniquement et une analyse reposant sur le théorème du moment cinétique et de l'énergie cinétique s'efforce de démontrer que le produit de la force par la vitesse, préconisé par les physiologistes ne peut être représentatif de la puissance mécanique développée par un athlète. Ces travaux sont riches d'enseignement et incitent à poursuivre avec précaution dans l'utilisation des concepts mécaniques et physiologiques. Ils ouvrent à des logiques de formations où les chercheurs, les entraîneurs et les sportifs tirent mutuellement des enrichissements de leurs spécificités culturelles.

Les perspectives de ce travail, tendent surtout à montrer que c'est dans la cohabitation des disciplines scientifiques que se font et se réaliseront les plus grandes découvertes comme cela fut démontré dans les œuvres analysées, où les auteurs avaient un savoir très éclectique. Dorénavant les études sur la locomotion animale s'orientent sur deux voies principalement.

⁵⁵³ Mouahid A. *Analyse dynamique et cinématique des sauts verticaux*. Poitiers : thèse en sciences biologiques et fondamentales appliquées. Psychologie, 1992.

⁵⁵⁴ Hambli M. *Contribution à une analyse mécanique de la mesure des capacités physiques des athlètes : cas des épreuves sur ergocycles*. Poitiers : thèse de mécanique et physiologie de l'entraînement, 1997.

Conclusion générale

Une première thématique sur la définition des méthodes de modélisation les mieux adaptées aux simulations du mouvement animal et de sa performance motrice. Pour cela, les auteurs doivent modéliser à la fois les phénomènes observables par des approches cinématiques et les causes mécaniques de ces phénomènes par des approches dynamiques. Mais la difficulté de ces recherches, consiste à la fois dans le choix de la nature du modèle, dans les techniques de mesure et d'identification des paramètres internes de ces modèles. Une fois définis, ces modèles peuvent être utilisés pour effectuer des simulations dans de nouvelles conditions. Le problème consiste alors à définir les méthodes de simulation à mettre en œuvre.

Une deuxième thématique concerne la définition et la mise en œuvre d'outils de compréhension de la performance locomotrice. Les outils à développer dans le futur devraient concerner à la fois l'amélioration quantitative et qualitative de la mesure de la performance motrice, notamment en élaborant de nouveaux matériels et méthodes de traitement de l'information. Il en est de même du rendu graphique multimédia intégrant les résultats de simulations sous forme de logiciel d'analyse. Les études mécano physiologiques montrent que le contrôle mécanique du mouvement tout comme le contrôle métabolique sont susceptibles d'adaptations spécifiques suivant les types et les techniques de locomotion. C'est ce qu'indiquent différents résultats trouvés sur la relation entre l'énergie métabolique et l'énergie mécanique. Le calcul des travaux des forces internes avec les différents appareils physiologiques, depuis les énergies potentielles et les énergies cinétiques segmentaires, ainsi que la mesure de l'énergie métabolique dépensée pour effectuer le mouvement indique des variations importantes dans la restitution de l'énergie. Ces différences dans ce qui constitue une sorte de rendement, peuvent amener à revisiter les méthodes d'évaluation de la locomotion, de plus en plus basées sur les relations entre le métabolisme et sa restitution mécanique. Reste à associer à ces systèmes, la vision de l'organisation et du cheminement du contrôle neurosensoriel et moteur, notamment la commande des modèles rythmiques des membres et du mouvement à la base des fonctions et des stabilités locomotrices⁵⁵⁵.

L'histoire des sciences et des techniques sur l'étude du mouvement, montre au travers des champs scientifiques concernés, les multiples évolutions des outils expérimentaux qui donnent accès à la supposition, puis à la visibilité des phénomènes.

⁵⁵⁵ Biewener A. *Animal Locomotion*. Oxford; New York : Oxford University Press, 2003.

Conclusion générale

L'interprétation pour la compréhension, suit en continue par filiations de brusqueries théoriques. Elle crée des modèles synthétisant la complexité, ceux-ci procurent des avancées sur les mécanismes fondamentaux de la science biologique qui permettent de comprendre comment les animaux ont évolué pour se déplacer dans leur environnement physique. L'ensemble des connaissances théoriques sur le vivant et sa locomotion, ne figure nulle part dans un répertoire encyclopédique, mais est implanté dans des individus qui en sont les porteurs par l'intermédiaire de leurs œuvres. La biologie est un patrimoine théorique social⁵⁵⁶ en perpétuelle construction, mais toujours instable, faisant dire à François Jacob que « *Comme les autres sciences de la nature, la biologie a perdu aujourd'hui nombre de ses illusions. Elle ne cherche plus la vérité. Elle construit la sienne. La réalité apparaît alors comme un équilibre toujours instable. Dans l'étude des êtres vivants, l'histoire met en évidence une succession d'oscillations, un mouvement de pendule entre le continu et le discontinu, entre la structure et la fonction, entre l'identité des phénomènes et la diversité des êtres. C'est de ce balancement qu'émerge peu à peu l'architecture du vivant, qu'elle se révèle dans des couches enfouies toujours plus profondément* »⁵⁵⁷.

⁵⁵⁶ Bonitzer J. *Les chemins de la science. Questions d'épistémologie*. Paris : Editions sociales, 1993, p. 52.

⁵⁵⁷ Jacob F. *La Logique du vivant : une histoire de l'hérédité*. Paris : Gallimard, 1970, p. 24.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ajan T., Baroga, L. *Weightlifting: Fitness for all Sports*. Budapest: International Weightlifting Federation, 1988.
- Alexander R. M. *Basic mechanics. Mechanics of animal locomotion*. In Alexander RM, editor. *Advances in comparative and environmental physiology*, vol. 11. Berlin: Springer-Verlag; 1992, 1-15.
- Alexander R. M. Design by numbers. *Nature*, 2001, 412: 591.
- Alexander R. M. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 1976, 261: 129-30.
- Alexander R. M. *Exploring biomechanics. Animals in motion*. New York: Scientific American Library, 1992.
- Alexander R. M. How dinosaurs ran. *Scientific American*, 1991, 264(4): 62-8.
- Alexander R. M. *Locomotion in animals*. Glasgow: Blackie & Son, 1982.
- Alexander R. M. *Animal mechanics*. Oxford: Blackwell, 1983.
- Alexander R. M. *Elastic mechanisms in animal movement*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- Alexander R. M. *Exploring biomechanics. Animals in motion*. New York: Scientific American Library, 1992: 36-40.
- Alexander R. M. Mechanics and scaling of terrestrial locomotion. In Pedley TJ, editor. *Scale effects in animal locomotion*. London: Academic Press, 1977: 93-110.
- Alexander R. M. Optimization and gaits in the locomotion of vertebrates. *Physiological Reviews*, 1989, 69(4): 1199-227.
- Alexander R. M. Energy-saving mechanisms in walking and running. *The Journal of Experimental Biology*, 1991, 160: 55-69.
- Alexander R. M. Stride length and speed for adults, children, and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 1984, 63: 23-7.
- Alexander R. M. *Terrestrial locomotion*. In Alexander R. M., Goldspink G. *Mechanics and energetics of animal locomotion*. London: Chapman and Hall, 1977.
- Alexander R. M. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *International Journal of Robotics Research* 1984, 3(2): 49-59.
- Alexander R. M. *The mechanics of walking*. In Elder HY, Trueman ER, editors. *Aspects of animal motion*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 221-35.
- Alexander R. M. Tyrannosaurus on the run. *Nature*, 1996, 379: 121.
- Alexander R. M., Jayes A. S. A dynamic similarity hypothesis for the gaits of quadrupedal mammals. *Journal of Zoology*, 1983, 201: 135-52.
- Alexander RM., Jayes AS. A dynamic similarity hypothesis for the gaits of quadrupedal mammals. *Journal of Zoology*, 1983, 201: 135-52.
- Alexander RM., Langman VA., Jayes AS. Fast locomotion of some African ungulates. *Journal of Zoology*, 1977, 183: 291-300.
- Alexander RM. Estimates of energy cost for quadrupedal running gaits. *Journal of Zoology*, 1980, 190: 155-92.
- Alexander RM. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 1976, 261: 129-30.
- Alexander RM. Optimum walking techniques for quadrupeds and bipeds. *Journal of Zoology*, 1980, 192: 97-117.
- Allard P., Bianchi J.-P. *Biomécanique*. Paris : Presses Universitaires de France, 1999.
- Amar J. *Le rendement de la machine humaine : recherches sur le travail*. Paris : J.B. Baillière, 1909.

Références et sources bibliographiques

- Amar J. *The human motor; or, The scientific foundations of labour and industry*. London : Routledge, 1920.
- Andrieu G. *Force et beauté. Histoire de l'esthétique en Éducation Physique aux XIX^e et XX^e siècles*. Talence : Presses universitaires de Bordeaux, 1992.
- Andrieu G. *L'homme et la force*. Joinville-le-Pont : Actio Bazina, 1988.
- Antoine P., Poinsoit R., Congard A. Évaluer le bien-être subjectif : la place des émotions dans les psychothérapies positives. *Journal de thérapie comportementale et cognitive*, 2007, 17(4) : 170-180.
- Aragon-Vargas L., Goss M. Kinesiological factors in vertical jump performance : differences among individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 1997, 13: 24-44.
- Aristote. *Les Météorologiques*. Texte établi et traduit par Jules Tricot. Paris : J. Vrin, 1941.
- Aristote. *Les parties des animaux. Traduction et interprétation de Pierre Louis*. Paris : Société d'édition « les belles lettres », 1956.
- Aristote. *Marche des animaux. Mouvement des animaux. Index des traités biologiques. Texte établi et traduit par Pierre Louis*. Paris : société d'édition Les belles lettres, 1973.
- Aristote. *Parties des animaux*. Livre I. Traduction de Jean-Marie Le Blond, introduction de Pierre Pellegrin. Paris, Aubier, 1945.
- Aristote. *Psychologie d'Aristote. Opuscules (Parva Naturalia). Traduits en français pour la première fois et accompagnés de notes perpétuelles par Barthelemy Saint-Hilaire Jules*. Paris : Dumont, 1847.
- Aristoteles. *Partes de los animales. Marcha de los animales. Movimiento de los animales*. Jimenez Sanchez-Escariche E., Alonso Miguel A. Madrid: Gredos. 2000.
- Ascenzi A. Biomechanics and Galileo Galilei. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(2): 95-100.
- Asseman F. *Etude du transfert d'habiletés chez des gymnastes experts dans différents maintiens posturaux*. Toulon : thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 2004.
- Attia A. *À propos du renforcement musculaire - analyse mécanique de techniques de soulevés de charge*. Université de Poitiers, thèse de mécanique et physiologie de l'entraînement, 1997.
- Aujoulat N. *Lascaux : le geste, l'espace et le temps*. Paris : Seuil, 2004.
- Axis l'univers documentaire Hachette. Dossiers. *La locomotion des êtres vivants*. Bagneux : le livre de Paris - Hachette, 1993, 6 : 224-228.
- Bandi H.-G. *L'Âge de pierre : quarante millénaires d'art pariétal*. Paris : A. Michel, 1960.
- Barraclough G. *Tendances actuelles de l'histoire*. Paris : Flammarion, 1980.
- Barthez P.-J. *Nouvelle mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*. Carcassonne : Imprimerie de Pierre Polere, 1798.
- Bataille G. *La peinture préhistorique : Lascaux ou : la naissance de l'art*. Genève : Skira, 1955.
- Baudinette R. V. The energetic and cardiorespiratory correlates of mammalian terrestrial locomotion. *The journal of experimental biology*, 1991, 160: 209-231.
- Baumann W., Gross V., Quade K., Galbierz P., Schwirtz A. The snatch technique of world class weightlifters at the 1985 World Championships. *International Journal of Sports Biomechanics*, 1988, 4: 68-89.
- Bejan A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 2000.
- Bejan A., Marden J. Locomotion : une même loi. [Constructing Animal Locomotion from New Thermodynamics Theory. American Scientist. The magazine of sigma XI, the scientific research society. Volume 94, 4, 2006.] *Pour la science*, 2006, 346 : 68-73.

Références et sources bibliographiques

- Belen L. *Les pédaliers expérimentaux : effets sur la demande métabolique, sur les réponses cardio-ventilatoires et sur la performance de deux prototypes au cours d'épreuves d'effort*. Montpellier 1 : thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 2006.
- Bergson H. *Durée et simultanéité. À propos de la théorie d'Einstein*. Paris : Félix Alcan, 1922.
- Bernard C. *Introduction à la médecine expérimentale*. Paris : J-B. Baillière fils, 1865.
- Bernard P. Ergonomie du déplacement en fauteuil roulant chez le traumatisé médullaire. *STAPS*, 1994, 35 : 77-92.
- Bernier F. *Abrégé de la philosophie de Gassendi*. Lyon : chez Anisson, Posuel & Rigaud, 1684.
- Berthoz A. *La chimie et le sport*. Les Ulis : EDP sciences, 2011.
- Berthoz A. *La simplicité*. Paris : O. Jacob, 2009.
- Biewener A. *Animal Locomotion*. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- Bischoff G.-T. et al. Encyclopédie anatomique : comprenant l'anatomie descriptive, l'anatomie générale, l'anatomie pathologique, l'histoire du développement, et celle des races humaines. Paris : J.-B. Baillière, 1843.
- Bitbol-Hesperies A. *Le Principe de vie chez Descartes*. Paris : J. Vrin, 1990.
- Blay M. *Critique de l'histoire des sciences*. Paris : CNRS Editions, DL 2017.
- Blay M. *La science du mouvement de Galilée à Lagrange*. Paris : Éditions Belin, 2002.
- Blay M., Halleux R. *La science classique, XVI^e-XVIII^e siècle : dictionnaire critique*. Paris : Flammarion, 1998.
- Bloch M. *Apologie pour l'histoire ou métier d'historien*. [1949]. Paris : Armand Colin, 1974.
- Bodeüs R. *Aristote : Une philosophie en quête de savoir*. Paris : Librairie Philosophique Vrin, 2002.
- Boisacq-Schepens N. Le contrôle moteur de la marche. *Neurochirurgie*, 1998, 44 (3) : 158-166.
- Bolanzadeh N., Tam R., Handy TC., Nagamatsu LS., Hsu CL., Davis JC., Dao E., Beattie BL., Liu-Ambrose T. Resistance Training and White Matter Lesion Progression in Older Women: Exploratory Analysis of a 12-Month Randomized Controlled Trial. *The Journal of The American Geriatrics Society*, 2015, 63(10), 52-60.
- Bonitzer J. *Les chemins de la science. Questions d'épistémologie*. Paris : Editions sociales, 1993.
- Bonnard A., Detienne M. *Civilisation grecque d'Euripide à Alexandre*. Paris : éditions Complexe, 1991.
- Borelli Giovanni Alfonso. *On the Movement of Animals*. Traduction de Paul Maquet. Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1989.
- Bouisset S. Relation entre support postural et mouvement intentionnel : approche biomécanique. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique*, 1991, 99, A77-A92.
- Bouisset S. *Biomécanique et physiologie du mouvement*. Paris : Masson, 2002.
- Boutroux E. Aristote. In Berthelot Marcellin (sous la direction de) *La grande encyclopédie. Inventaire raisonné des sciences, des lettres et des arts par une société de savants et de gens de lettres*. Paris : H. Lamirault et C^{ie} Editeurs, 1885-1902, Tome III : 933 - 954.
- Braudel F. *Écrits sur l'histoire*. Paris : Flammarion, 1991.
- Bray K. *Comment marquer un but : les lois secrètes du football*. Paris : JC Lattès, 2006.
- Brehm A. E. *La vie des animaux illustrée*. Paris : [s.n.], 1870.
- Breimer L., Sourander P. Alphonso Borelli and Christina. The father of kinesiology and the Queen of Sweden. *Clio medica*, 1965: 155-65.

Références et sources bibliographiques

- Brière N., Vallerand, R., Blais, M., Pelletier, L. Développement et validation d'une mesure de motivation intrinsèque, extrinsèque et d'amotivation en contexte sportif : l'Échelle de Motivation dans les Sports (EMS). *International Journal of Sport Psychology*, 1995, 26 : 465-489.
- Brunot F. *Histoire de la langue française*. Paris : A. Colin, 1905-1979.
- Buchet N., Dagneaux P., Coppens Y. *L'odyssée de l'espèce*. Paris : EPA, 2003.
- Buican D. *Histoire de la biologie. Hérité - Évolution*. Paris : Editions Nathan, 1994.
- Bushnell G. H. A list of the published writings of D'Arcy Wentworth Thompson. In Clark Welg, Medawar PB. *Essays on growth and form*. Oxford: Clarendon Press, 1945, 386-400.
- Byl S. *Recherches sur les grands Traités biologiques d'Aristote*. Bruxelles : Passim, 1980.
- Caldwell GE., Li L., McCole SD., Hagberg JM. Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling. *Journal of Applied Biomechanics*, 1998, 14(3): 245-259.
- Campbell N. A., Reece J. B., Mathieu R. *Biologie*. Bruxelles : De Boeck Université, 2006.
- Canguilhem G. *La connaissance de la vie*. Paris : Hachette, 1952.
- Canguilhem G. *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris : PUF, 1955.
- Canguilhem G. et al. *Anatomie d'un épistémologue : Dagognet François*. Paris : J. Vrin, 1984.
- Cappozzo A., Marcheni M., Tosi V. *Biocommotion: Century of research using moving pictures*. Rome : Promograph, 1992.
- Cavagna G. A., Kaneko M. Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology London*, 1977, 268: 467-481.
- Chauveau A. *L'énergie dépensée par le travail intérieur des muscles dans leurs divers modes de contraction*. Paris : [s.n.], 1904.
- Chevalier L. *La frontière entre guerre et paix*. Paris : L'Harmattan, 2004.
- Chollet D. *L'optimisation de la performance en natation : l'étude spatio-temporelle de la performance en compétition et l'analyse cinématique et cinétique de la nage comme connaissance des résultats et feedbacks d'information pour le nageur*. Université de Montpellier 1 : Habilitation à diriger des recherches en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 1995.
- Clottes J. *Passion préhistoire*. Paris : la Maison des roches, 2003.
- Clottes J., Courtin J. *La grotte Cosquer : peintures et gravures de la caverne engloutie*. Paris : Seuil, 1994.
- Cnockaert J. C., Pertuzon E. Détermination des constantes biomécaniques d'un segment corporel (avant-bras plus main). II. Mesure de la position du centre de gravité. *Le Travail Humain*, 1970, 33 (3-4) : 335-340.
- Comar P. *Figures du corps, une leçon d'anatomie à l'École des beaux-arts*. Paris : Editions beaux-arts, 2008.
- Coppens Y. *L'odyssée de l'espèce*. Paris : éditions EPA-Hachette-Livre, 2003.
- Cormie P., McGuigan MR., Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 1- biological basis of maximal power production. *Sports Medicine*, 2011, 41(1): 17-38.
- Cormie P., McGuigan MR., Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 2 - training considerations for improving maximal power production. *Sports Medicine*, 2011, 41(2): 125-46.
- Coutard J-P. *Le vivant chez Leibniz*. Paris : L'Harmattan, 2007.
- Croisier J.-L., Ganteaume S., Binet J., Genty M., Ferret J.-M. Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: a prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 2008, 36(8): 1469-75.

Références et sources bibliographiques

- Dagg A. I. Running, walking and jumping. In Cappozzo A., Marchetti M., Tosi, V. (Eds.), *Biocomotion: A Century of Research Using Moving Pictures*. Rome : Promograph, 1977.
- Dagognet F. *Etienne-Jules Marey : la passion de la trace*. Paris : Hazan, 1987.
- Desbonnet E. *Les poids et haltères*. In P. Moreau, G. Voulquin. Les sports modernes illustrés. Encyclopédie sportive illustrée. Paris : Larousse, 1906, p. 263-269.
- Davids K., Araújo D., Correia V., Vilar, L. How small-sided and conditioned games enhance acquisition of movement and decision-making skills. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2013, 41(3): 154-61.
- De Mondenard J.-P. *Dopage aux Jeux Olympiques*. Paris : Amphora, 1996.
- De Vinci L. *Les carnets de Léonard de Vinci*. Introduction, classement et notes par Edward Mac Curdy. Paris : Gallimard, 1942.
- Debru C. La chimie, formation de modèles morphologiques. In Canguilhem G. et coll. *Anatomie d'un épistémologue : Dagognet François*. Paris : J. Vrin, 1984.
- Delambre J.-B. *Histoire de l'astronomie moderne*. Paris : Courcier, libraire pour les sciences, 1821.
- Delattre P. Formalisation Concepts and Exploration Concepts. *Scientia*, 1974, 109: 459-481.
- Demeny G. *L'Éducation de l'effort, psychologie, physiologie*. Paris : Félix Alcan, 1914.
- Demeny G. *Pédagogie générale et Mécanisme des Mouvements*. Paris : Félix Alcan, 1922.
- Desbonnet E. *Les Rois de la force*. Paris : Berger-Levrault, 1911.
- Descartes R. *Œuvres de Descartes, publiées : Les passions de l'âme. Le monde, ou Traité de la lumière. L'homme. De la formation du fœtus*. [Publiés par Victor Cousin]. Paris : chez F. G. Levrault, Libraire, 1834.
- Devillard X., Calmels P., Sauvignet B., Belli A., Denis C. Validation of a new ergometer adapted to all types of manual wheelchair. *European Journal of Applied Physiology*, 2001, 85: 479-485.
- Dowling J., Vamos L. Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 1993, 9 : 95-110.
- Duboy J., Junqua A., Lacouture P. L'introduction des concepts de la mécanique dans l'analyse des gestes athlétiques. La contribution des deux précurseurs : E.J. Marey et G. Demeny. *Revue Science et motricité*, 1992, 18 : 35-44.
- Dumas C.-L. *Principes De Physiologie, ou Introduction à la science expérimentale, philosophique et médicale de l'homme vivant*. [Tome Troisième] Paris : chez Deterville, 1800.
- Dumont J.-P. *Introduction à la méthode d'Aristote*. Paris : J. Vrin, 1986.
- Duncan W. J. *Physical similarity and dimensional analysis*. London : Edward Arnold, 1953.
- Durand M. et coll. Etude des concomitants énergétiques de la transition marche-course. In Laurent M. et coll. *Recherches en APS 3*. Paris : Editions Actio / Université Aix-Marseille II, 1992.
- Durand-Richard M.-J. *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique, perspective historique*. Paris : L'Harmattan, 2007.
- Enoka R. *Neuromechanical basis of Kinesiology*. Humankinetics. Champaign (Ill.): Human kinetics, 1994.
- Enoka RM. Load and skill-related changes in segmental contributions to a weightlifting movement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1988, 20: 178-187.
- Enoka RM. Muscular control of a learned movement: the speed control system hypothesis. *Experimental Brain Research*, 1983, 51(1): 135-45.
- Evrard F. *Dictionnaire passionné du football*. Paris : Presses universitaires de France, 2006.

Références et sources bibliographiques

- Fagot-Largeault A. *Leçon inaugurale. Chaire de philosophie des sciences biologiques et médicales*. Paris : Collège de France, 2001 : 5.
- Farlow J. O. Estimates of dinosaur speeds from a new trackway site in Texas. *Nature*, 1981, 294 : 747-8.
- Faupin A. *Analyse biomécanique de la propulsion en fauteuil roulant à manivelles*. Lille : thèse de doctorat en Sciences du sport, 2005.
- Fontenelle R. L'éloge de Chirac. *L'Histoire de l'Académie des sciences de Paris*, 1732.
- Froude W. On the comparative resistances of long ships of several types. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1876, 17, 181-8.
- Froude W. On useful displacement as limited by weight of structure and of propulsive power. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1874, 15: 148-55.
- Froude W. The theory of "stream lines" in relation to the resistance of ships. *Nature*, 1875, 13: 50-2.
- Fry AC, Schilling BK, Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, Thrush JT. Muscle fiber characteristics and performance correlates of male Olympic-style weightlifters. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 2003, 17(4): 746-54.
- Gagne J. *L'aporie du mouvement - changement dans la Physique d'Aristote*. Thèse de doctorat, Institut d'études médiévales, Université de Montréal, 1967.
- Gahéry Y. Équilibre et maintien de la posture. *Motricité cérébrale*, 1993, 14 : 89-104.
- Galluzzi P. G. A. Borelli dal Cimento agli Investiganti. In Lomonaco, Fabrizio, Torrini, Maurizio. *Galileo e Napoli*. Congrès à Naples du 12-14 avril 1984. Naples : Guida, 1987: 339-355.
- Garhammer J. Energy flow during Olympic weight lifting. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1982, 14(5): 353-60.
- Garhammer J., Gregor R. *Propulsion forces as a function of intensity for weightlifting and vertical jumping*. The journal of applied sport science research, 1992, 3: 129-134.
- Gendrier M. *Gestes et mouvements justes*. Les Ulis : EDP Sciences, 2004.
- Gendrier M. *L'ergomotricité : le corps, le travail et la santé*. Grenoble : Presses universitaires de Grenoble, 1995.
- Gennes P.-G. *Leçon inaugurale au collège de France. Physique de la matière condensée*. Paris : Collège de France, 10 novembre 1971.
- Gheluwe B., Huybrechts P., Deporte E. Electromyographic evaluation of arm and torso muscles for different postures in Windsurfing. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1988, 4: 156-165.
- Gingras Y. *Sociologie des sciences*. Paris : Presses universitaires de France, 2013.
- Gille B. *Les ingénieurs de la Renaissance*. Paris : Seuil, 1978.
- Giraudoux J. *Préface à l'anthologie La Gloire du football. Recueil des meilleures pages sur le football*. Paris : éditeur Fernand Aubier, 1927.
- Gleyse J. *L'instrumentalisation du corps. Une archéologie de la rationalisation instrumentale du corps, de l'Âge classique à l'époque hypermoderne*. [Chapitre 12. L'homme énergétique]. Paris : L'Harmattan, 1997.
- Gould S. J. *La structure de la théorie de l'évolution*. Paris : Gallimard, 2006.
- Gribenski A., Caston J. *La posture et l'équilibre*. Paris : Presses universitaires de France, 1973.
- Guenard H. *Physiologie humaine*. Rueil-Malmaison : Ed. Pradel, 2001.
- Guyenot É. *L'évolution de la pensée scientifique. Les sciences de la vie aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris : A. Michel, 1941.

Références et sources bibliographiques

- Hambli M. *Contribution à une analyse mécanique de la mesure des capacités physiques des athlètes : cas des épreuves sur ergocycles*. Poitiers : thèse de mécanique et physiologie de l'entraînement, 1997.
- Hayes G., Alexander R. M. The hopping gaits of crows (Corvidae) and other bipeds. *Journal of Zoology*, 1983, 200: 205-13.
- Healey JF. *The Early Alphabet : Reading the Past*. Londres : British Museum Press, 1996.
- Hill A. V. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of Royal Society London (Biol)*, 1938, 126: 136-195.
- Höfding H. *Histoire de la philosophie moderne*. Paris : éditeur Félix Alcan, 1906.
- Horvath L. *L'évolution historique des méthodes de musculation*. In INSEP Les dossiers de l'entraîneur « Le renforcement musculaire ». Paris : INSEP, 1984.
- Hourticq L. *La vie des images*. Paris : Hachette, 1927.
- Hrysomallis C. Balance ability and athletic performance. *Sports Medicine*, 2011, 41(3): 221-32.
- Hugo V. *William Shakespeare*. Paris : Librairie internationale, 1964.
- Hull ML., Gonzalez H. Bivariate optimization of pedalling rate and crank arm length. *Journal of Biomechanics*, 1988, 21: 839-849.
- Ignazi G., Pineau H. Centre de gravité et moments d'inertie du corps humain : Historique, mesure, signification fonctionnelle et évolutive. [Biométrie des ceintures et des membres. Colloque de la Société de Biométrie Humaine, Paris.] *Biométrie humaine et anthropologie*, 2000, 18(1-2) : 29-41.
- Isidore de Séville. *Etymologies. Livre 12 : Des animaux*. Texte établi, traduit et commenté par Jacques André. Paris : Les Belles Lettres, 1986.
- Jacob F. *La Logique du vivant : une histoire de l'hérédité*. Paris : Gallimard, 1970.
- Jeu B. *Le sport, l'émotion, l'espace : essai sur la classification des sports et ses rapports avec la pensée mythique*. Paris : Édition Vigot, 1977.
- Joly R. La biologie d'Aristote. *Revue Philosophique*, 1968, 2 : 219-253.
- Junqua A., Duboy J., Lacouture P. *Mécanique humaine - éléments d'une analyse des gestes sportifs en deux dimensions*. Paris : Édition Revue EPS, 1994.
- Kautz SA., Hull ML. A theoretical basis for interpreting the force applied to the pedal in cycling. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(2): 155-65.
- Kemoun G., Defebvre L., Watelain E., Guieu JD., Destée A. Parkinson's disease as a model of aging: prospective analysis of gait disorders. *Revue neurologique (Paris)*, 2003, 159 (11): 1028-37.
- Kemoun G. Physiologie de la marche - particularités chez la personne âgée. Thème « La chute » In *La lettre de Médecine Physique et Réadaptation*, 2001, 59.
- Kerlirzin Y., Dietrich G., Megrot F. EPS interroge Simon Bouisset biomécanicien du mouvement. *Revue EPS*, 2005, 316 : 5-10.
- Koering J. *Léonard de Vinci*. Paris : Musée du Louvre, 2003.
- Koyré A. *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*. Paris : Presses universitaires de France, 1966.
- Koyré A. *Galilée et la révolution scientifique du XVII^e siècle*. Paris : Librairie du Palais de la découverte, 1955.
- Koyré A. *La révolution astronomique : Copernic, Kepler, Borelli*. Paris : Hermann, 1961.
- Kramer S.N. *L'histoire commence à Sumer*. Paris : Editions Flammarion, 1993.

Références et sources bibliographiques

- Lacouture P., Junqua A. Plate-forme de forces et analyse du geste sportif. *Revue Science et Motricité*, 1991, 15 : 41-51.
- Lambert G. *Haltérophilie : le guide du spécialiste*. Paris : Vigot, 1978.
- Lambert G. Haltérophilie. *Revue Éducation Physique et sportive*, 1960, 48 : 42-44.
- Latash M. L. *Bases neurophysiologiques du mouvement*. Traduction de la première édition américaine Neurophysiological Basis of Movement (1998) par Paul Delamarche et Arlette Delamarche. Paris : DeBoeck Université, 2002.
- Lauder MA., Lake JP. Biomechanical comparison of unilateral and bilateral power snatch lifts. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(3): 653-660.
- Lazhar G. *Étude biomécanique d'un mouvement olympique d'haltérophilie : l'arraché à deux bras*. Université Paris 11, thèse en physiologie et biomécanique du mouvement, 1981.
- Le Guyader H. *Théories et histoire en biologie*. Paris : J. Vrin, 1988.
- Leakey M. D., Hay R. L. Pliocene footprints in the Laetoli Beds at Laetoli northern Tanzania. *Nature*, 1979, 278: 317-323.
- Lefebvre R. Aristote zoologue : décrire, comparer, définir, classer. *Archives de Philosophie*, 1998, 61 : 33-59.
- Lehance C., Binet J., Bury T., Croisier J.-L. Muscular strength, functional performances and injury risk in professional and junior elite soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2009, 19(2): 243-51.
- Lesay J. *Les plus grands gardiens de but du football français*. Paris : Calman-Lévy, 2008.
- Levavasseur G. *Intérêt, rôle et limites du test de Ruffier Dickson à partir de l'étude de 173 sportifs*. Rouen : Thèse de médecine, 2000.
- Lloyd G. E. *La Science grecque après Aristote*. Traduit de l'anglais par Jacques Brunshwig. Les sources de l'Histoire des Animaux. Paris : éditions La Découverte. 1990.
- Lloyd G. E. R. *La Science grecque après Aristote*. Paris : Ed. La Découverte, 1990.
- Locke J. *An essay concerning Human Understanding*. Oxford : Editeur P. H. Nidditch, Clarendon Press, 1975.
- Longo U., Loppini M., Cavagnino R., Maffulli N., Denaro V. Musculoskeletal problems in soccer players: current concepts. *Clinical Cases in mineral and bone metabolism*, 2012, 9(2): 107-11.
- Loquet H. *Etude électromyographique sur simulateur de la pratique de la planche à voile*. Thèse de médecine, université de Lille, 1983.
- Luminet J.-P. *Le secret de Copernic*. Paris : Editions Jean-Claude Lattès, 2006.
- Maquet P. *On the Movement of Animals*. Berlin : Springer, 1989.
- Marey E.J. *De la mesure dans les différents actes de la locomotion*. Paris : Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1883, 97 : 820-825.
- Marey E.-J. *La machine animale : locomotion terrestre et aérienne*. Paris : Germer Baillière, 1873.
- Mayr E. *Histoire de la biologie : diversité, évolution et hérédité*. Paris : Fayard, 1989.
- Mazouer C. *L'animal au XVII^e siècle*. Actes de la 1^{ère} Journée d'étude, 21 novembre 2001, du Centre de recherches sur le XVII^e siècle européen, 1600-1700. Université Michel de Montaigne-Bordeaux III. Journée d'étude publiée par Gunter Narr Verlag, 2003.
- Mechoulan H. *Problématique et réception du Discours de la méthode et des Essais*. Paris : J. Vrin, 1988.
- Meurgey B. Electromyographie globale et individualisation de l'entraînement. *Science et Sports*, 1994, 9 : 19-25.

Références et sources bibliographiques

- Minetti A., Ardigo L. Halteres used in ancient Olympic long jump. *Nature*, 2002, 420, 141-142.
- Monod T. *Gravures, peintures et inscriptions rupestres*. Paris : Larose, 1938.
- Monod T. *Révérance à la vie*. Paris : éditions Grasset & Fasquelle, 1999.
- Montucla J-É. *Histoire des Mathématiques*. Tome IV. Paris : A. Blanchard, 1968.
- Morel P.-M. *Aristote. Une philosophie de l'activité*. Paris : éditions Flammarion, 2003.
- Morin E. *Introduction à la pensée complexe*. Paris : ESF éditeur, 1990.
- Morya E., Ranvaud R., Pinheiro WM. Dynamics of visual feedback in a laboratory simulation of a penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 2003, 21(2): 87-95.
- Mouahid A. *Analyse dynamique et cinématique des sauts verticaux*. Poitiers : thèse en sciences biologiques et fondamentales appliquées. Psychologie, 1992.
- Myers M. J., Steudel K., White S. C. Uncoupling the correlates of locomotor costs: a factorial approach. *Journal of Experimental Zoology*, 1992, 265: 211-223.
- Nesi X. *Prédiction de la performance et de son amélioration en cyclisme sur route*. Lille : thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives, 2004.
- Pascal B. *Œuvres complètes de Blaise Pascal*. Paris : librairie de L. Hachette et Cie, 1858.
- Pastoureau M. *L'ours. Histoire d'un roi déchu*. Paris : Édition du Seuil, 2007
- Pellegrin P. *La Classification des animaux chez Aristote : statut de la biologie et unité de l'aristotélisme*. Paris : Les Belles lettres, 1982.
- Picq P. et coll. *La plus belle histoire des animaux*. Paris : Editions du Seuil, 2000.
- Plas F., Viel É., Blanc Y. *La marche humaine. Kinésiologie dynamique, biomécanique et pathomécanique*. Paris : Masson, 1979.
- Poplu, G., Ripoll, H., Mavromatis, S., Baratgin, J. How do expert soccer players encode visual information to make decisions in simulated game situations? *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2008, 79(3): 392-398.
- Poulain M., Bernard P., Vinet A., Bouges S. *Recherche du réglage optimal en vue de la performance sportive*. In : Simon L., Pélissier J., Hérisson C. *Le fauteuil roulant*. Paris : Masson, 1997 : 310-317.
- Pozzo TH., Clément G., Berthoz A. Étude du contrôle moteur de l'appui tendu renversé sur les mains. *Agressologie*, 1988, 29(9) : 649-651.
- Proske U. Energy conservation by elastic storage in kangaroos. *Endeavour*, 1980, 4: 148-153.
- Quidu M. *Les sciences du sport en mouvement : innovations et traditions théoriques en STAPS*. Paris : l'Harmattan, 2012.
- Rabischong P. *Le programme homme*. Paris : Presses universitaires de France, 2003.
- Reichholf J. H. *L'émancipation de la vie*. Traduit de l'allemand par Jeanne Etoré-Lortholary. Paris : Flammarion, 1993.
- Reichholf J. H. *L'émergence de l'homme : l'apparition de l'homme et ses rapports avec la nature*. Traduit de l'allemand par Jeanne Etoré-Lortholary. Paris, Flammarion, 1991.
- Reichholf J.-H. *Mouvement animal et évolution : courir, voler, nager, sauter*. Paris : Flammarion, 1994.
- Renous S. *Locomotion*. Paris : Dunod, 1990.
- Robène L., Léziart Y. *L'homme en mouvement : histoire et anthropologie des techniques sportives. Volume 2, [Techniques sportives et culture]*. Paris : Chiron, 2006.

Références et sources bibliographiques

- Robin J. Étude biomécanique analytique de l'attitude du véliplanchiste. *Cinésiologie*, 2000, 190 : 61-65.
- Roland E., Hulla M., Stover S. Design and demonstration of a dynamometric horseshoe for measuring ground reaction loads of horses during racing conditions. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38: 2102-2112.
- Rommelaere C. *Les chevaux du Nouvel Empire égyptien. Origines, races, harnachement*. Bruxelles : Connaissance de l'Égypte ancienne, 1991.
- Ronan C. *Histoire mondiale des sciences*. Paris : Editions du Seuil, 1988.
- Sato K., Sands WA., Stone MH. The reliability of accelerometry to measure weightlifting performance. *Sports biomechanics*, 2012, 11(4): 524-531.
- Schrödinger E. *What is life? The physical aspect of the living cell*. Cambridge : at the University press, 1947.
- Segond L. *Histoire et systématisation générale de la biologie*. Paris : JB Baillière, 1851.
- Serres M. *Le tiers-instruit*. Paris : Editions François Bourin, 1991.
- Servicen, L. *Les Carnets de Léonard de Vinci*. Paris : Gallimard, 1942.
- Shapin S. *La révolution scientifique*. Paris : Flammarion, 1998.
- Shorten M. R. Muscle elasticity and human performance. *Medicine and Sport Science*, 1987, 25: 1-18.
- Spratford W., Mellifont R., Burkett B. The influence of dive direction on the movement characteristics for elite football goalkeepers. *Sports Biomechanics*, 2009, 8(3): 235-44.
- Sprengel K., Jourdan A.-J.-Louis., Bosquillon E.-F.-M. *Histoire de la médecine : depuis son origine jusqu'au dix-neuvième siècle*. Paris : Deterville Th. Descoer, 1815.
- Stengers I., Bensaude-Vincent B. *100 mots pour commencer à penser les sciences*. Paris : Les Empêcheurs de penser en rond, Le Seuil, 2003.
- St-Louis-Deschênes M., Ilemberg D. L'exercice physique aigu et la performance cognitive chez l'enfant et l'adolescent. *Science & Sports*, 2013, 28(2) : 57-64.
- Stone MH, Sands WA, Pierce KC, Carlock J, Cardinale M, Newton RU. Relationship of maximum strength to weightlifting performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise (MSSE)*. 2005, 37(6): 1037-43.
- Stone MH, Pierce K, Sands WA, Stone ME. Weightlifting: A brief overview. *Strength and Conditioning Journal*, 2006, 28(1): 50-66.
- Sutherland D. The development of mature gait. *Gait Posture*, 1997, 6: 163-70.
- Taleb N. *Antifragile : Les bienfaits du désordre*. Paris : Les Belles Lettres, 2013.
- Teixeira L., de Oliveira D., Romano R., Correa S. Leg preference and interlateral asymmetry of balance stability in soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2011, 82(1): 21-7.
- Temperini, R. *L'ADCdaire de Léonard de Vinci*. Paris : Flammarion, 2002.
- Thom R. *Stabilité structurelle et morphogenèse : essai d'une théorie générale des modèles*. Paris : InterEditions, 1977.
- Thom R. *Paraboles et catastrophes*. Paris : Editions Flammarion, 1983.
- Thom R. *Esquisse d'une sémiophysique : Physique aristotélicienne et théorie des catastrophes*. Paris InterÉditions, 1989.
- Thom R. *Apologie du logos*. Paris : Editions Hachette, 1990.
- Thompson D. W. *Forme et croissance*. Paris : éditions du Seuil, édition du CNRS, 1994.
- Thulborn R. A. Estimated speed of a giant bipedal dinosaur. *Nature*, 1981: 292, 273-4.

Références et sources bibliographiques

- Thurston A. J. Giovanni Borelli and the study of movement: an historical review. *Australian and New Zealand Journal of Surgery*, 1999, 69(4): 276-288.
- Tropp H., Odenrick P. Postural control in single-limb stance. *Journal of Orthopaedic Research*, 1988, 6(6): 833-9.
- Trouessart J. *Recherches sur quelques phénomènes de la vision, précédées d'un essai historique et critique des théories de la vision, depuis l'origine de la Science jusqu'à nos jours*. Brest : imprimerie d'Edouard Anner, 1854.
- Vaillant A. *Corps en mouvement*. Saint-Etienne : Université de Saint-Etienne, 1996.
- Valentin M. *Travail des hommes et savants oubliés : histoire de la médecine du travail, de la sécurité et de l'ergonomie*. Paris : Éditions Docis DL, 1978.
- Vanpouille Y. *Épistémologie du corps en Staps : vers un nouveau paradigme*. Paris : l'Harmattan, 2011.
- Vaughan C. Theories of bipedal gait: an odyssey. *Journal of Biomechanics*, 2003, 36: 513-23.
- Veeger D., Van Der Woude L., Rozendal R. The effect of rear wheel camber, manual wheelchair propulsion. *Journal of Rehabilitation Research & Development (JRRD)*, 1989, 26: 37-46.
- Veyne P. *Comment on écrit l'histoire, suivi de Foucault révolutionne l'histoire*. Paris : Éditions du Seuil. 1971.
- Viatte F., Forcione V. *Léonard de Vinci : dessins et manuscrits*. [Exposition] Paris : Musée du Louvre, 5 mai - 14 juillet, 2003.
- Vigarello G. *Anthologie commentée des textes historiques de l'éducation physique et du sport*. Paris : Editions Revue EPS, 2001.
- Vigarello G. Les techniques corporelles et les transformations de leurs configurations. *STAPS*, 1986, 13(7) : 19-22.
- Viviani Vincenzo. *Vita di Galileo*. Bergamo : Moretti & Vitali, 1992.
- Welbergen E., Clijsen L. The influence of body position on maximal performance in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 1990, 61: 138-142.
- Wells K. F. *Kinesiology : the scientific basis of human motion*. Philadelphia : W.B. Saunders, cop. 1971.
- Whitteridge G. The Wilkins Lecture of the local movement of animals. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1979, 206: 1-13.
- Willems P., Cavagna G., Heglund N. External, internal and total work in human locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 1995, 198: 379-93.
- Williams A. M., Davids, K., & Williams, J. G. *Visual perception and action in sport*. London: E & F.N Spon, 1999.
- Williams AM. Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 18(9): 737-50.
- Williams M. *Biomécanique du mouvement humain. Une introduction*. [Traduction et adaptation de Drouin Bernard] Paris : Editions Vigot, 1986.
- Winter D. *Biomechanics and motor control of human movement*. New York : J. Wiley and sons, 1990.
- Winter D.A. Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model ? *Journal of Biomechanics*, 1995, 28(6): 753-758.
- Winter DA., Prince F., Frank JS., Powell C., Zabjek KF. Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 1996, 75(6): 2334-43.

Références et sources bibliographiques

Young W., Rogers N. Effects of small-sided game and change-of-direction training on reactive agility and change-of-direction speed. *Journal of Sports Sciences*, 2014, 32(4): 307-314.

Ziv G., Lidor R. Physical characteristics, physiological attributes, and on-field performances of soccer goalkeepers. *International journal of sports physiology and performance*, 2011, 6(4): 509-24.

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aristote. *Histoire des animaux. Traduction et interprétation de Pierre Louis*. Paris : Société d'éditions Les Belles Lettres, 1964.

Aristote. *Métaphysique d'Aristote. Traduction en français avec des notes perpétuelles de Barthélemy Saint-Hilaire*. Tome 1, Paris : librairie Germer-Baillière et Cie, 1879.

Aristote. *Traité des parties des animaux et de la marche des animaux d'Aristote : Traduits en français pour la première fois et accompagnés de notes perpétuelles par J. Barthélemy-Saint Hilaire*. Paris : Librairie Hachette et Cie, 1885.

Balaguer Periguell E. *La introducción del modelo físico-matemático en la medicina moderna. Análisis de la obra de G. A. Borelli. De motu animalium*. Valencia: Cátedra e Instituto de Historia de la Medicina-Facultad de Medicina ; Cuadernos Hispánicos de historia de la medicina y de la ciencia XIV seria A, monografías, 1974.

Berard P-H. *Cours de physiologie, fait à la faculté de médecine de Paris*. Tome I. Paris : Labé éditeur, 1848.

Bidloo G. *Exercitationum Anatomico-Chirurgicarum Decades duæ*. Lugduni Batavorum apud Jordanum Luchtman, 1708. [C'est-à-dire : *Dissertations anatomiques & chirurgiques, de Godefroy Bidloo, divisées en deux Décades.*] Leiden : chez Jourdain Luchtman, 1709.

Buffon G.-L. *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du cabinet du roy*. Paris : Imprimerie royale, tome deux. 1749.

Carus J. V. *Histoire de la zoologie depuis l'antiquité jusqu'au XIX^e siècle*. Paris : librairie J.-B. Baillière et fils, 1880.

Chauveau A. *La vie et l'énergie chez l'animal : introduction à l'étude des sources et des transformations de la force mise en oeuvre dans le travail physiologique*. Paris : Asselin et Houzeau, 1894.

Chauveau A. *Le Travail musculaire et l'énergie qu'il représente*. Paris : Asselin et Houzeau, 1891.

Cousin V. *Œuvres de Descartes. Tome IV. Traité de l'homme*. Paris : chez F. G. Levrault, 1824.

Cuvier G., Saint-Agy T. M. *Histoire des sciences naturelles : depuis leur origine jusqu'à nos jours, chez tous les peuples connus*. [Tome 1]. Paris : Bechet, 1831.

Dagognet F. *Étienne-Jules Marey : la passion de la trace*. Paris : Hazan, 1987.

D'alembert J. *Discours préliminaire de l'Encyclopédie par D'Alembert*. Paris : Bureaux de la publication, 1866.

Daremberg C. *Histoire des sciences médicales*. Paris : J. B. Baillière, 1870.

Daremberg C. *Œuvres anatomiques, physiologiques et médicales de Galien*. Paris : J.B. Baillière, 1854.

Daremberg C. V. *Essai sur la détermination et les caractères des périodes de l'histoire de la médecine*. Paris : J. B. Baillière, 1850.

De Vinci L. *Traité de la peinture : précédé de la vie de l'auteur et du catalogue de ses ouvrages, avec des notes et observations de Pierre Marie Gault de Saint-Germain*. Genève : chez Sestié fils, Nouvelle édition, 1820.

Références et sources bibliographiques

- Demeny G. Etude des déplacements du centre de gravité dans le corps de l'homme pendant les actes de la locomotion. *Les comptes rendus de l'Académie des Sciences*, le 10 octobre 1887 : 1-2.
- Demeny G. *Les bases scientifiques de l'éducation physique*. Paris : Édition Alcan, 1903.
- Demeny G. *Mécanisme et éducation des mouvements*. Paris : Félix Alcan, 1904.
- Descartes R. *L'homme*. Paris : Garnier, [1662],1963.
- Dezeimeris J.-E., Ollivier C., Raige-Delorme J. *Dictionnaire historique de la médecine ancienne et moderne*. Paris : Béchet jeune, 1826-1839.
- Ducrotay H.-M. *De l'organisation des animaux. Principes généraux d'anatomie comparée*. Paris : F. G. Levrault, 1822.
- Duhem P. *Les Origines de la statique*. Paris : A. Hermann, 1903.
- Duhem P. *L'évolution de la mécanique*. Paris : A. Hermann, 1905.
- Duhem P. *Études sur Léonard de Vinci, ceux qu'il a lus, ceux qui l'ont lu*. Paris : A. Hermann, 1906-1913.
- Eloy N. F. J. *Dictionnaire historique de la médecine ancienne et moderne, ou mémoires disposés en ordre alphabétique pour servir à l'histoire de cette science et à celle des médecins, anatomistes, botanistes, chirurgiens et chimistes de toutes nations*. Mons : H. Hoyois 1778.
- Fabrizi D'acquapendente Girolamo (Fabricius Hieronymus). *Œuvres chirurgicales de Jérôme Fabrice d'Acquapendente... divisées en deux parties dont la première contient le Pentateuque chirurgical l'autre, toutes les Operations manuelles, qui se pratiquent sur le corps humain*. Lyon : Jean-Antoine Huguetan et Guillaume Bastier, 1670.
- Fabroni A. *Vitarum Italarum doctrina excellentium qui saeculo XVIII*. Tome II (Pisa, 1778), 222-324. Romae : Excudebat Komarek, apud Paulum Giunchi ..., in Typographio S. Michaelis ad Ripam, 1766-1780.
- Flourens P. *Buffon. Histoire de ses travaux et de ses idées*. Paris : Paulin, libraire éditeur, 1844.
- Flourens P. *Examen du livre de M. Darwin sur l'origine des espèces*. Paris : Garnier Frères, libraires-Editeurs, 1864.
- Giraud-Teulon Félix. *Principes de mécanique animale ou, Étude de la locomotion chez l'homme et les animaux vertébrés*. Paris : J.-B. Baillièrre et fils, 1858.
- Harvey W. *De Motu locali animalium*. Edition traduite par Whitteridge, Gweneth. Cambridge: University press, 1959.
- Heister L., Senac J.-B. *L'anatomie d'Heister : avec des essais de physique sur l'usage des parties du corps humain & sur le mécanisme de leurs mouvements : enrichie de nouvelles figures...* Paris : Jacques Vincent, 1735.
- Houdart M.-S. *Histoire de la médecine grecque depuis Esculape jusqu'à Hippocrate exclusivement*. Paris : J.-B. Baillièrre, 1856.
- Landi A. *Histoire de la littérature d'Italie*, tirée de l'italien de M. Tiraboschi, et abrégée par Antoine Landi. Suisse, Berne : 1784.
- Le Blond J.-M. *Logique et méthode chez Aristote : étude sur la recherche des principes dans la physique aristotélicienne*. Paris : Librairie philosophique J. Vrin, 1939.
- Louis P. *Les parties des animaux*. Paris : Les Belles Lettres, 1956.
- Lucrece. *De rerum natura. De la nature*. [1570]. Traduction, introduction et notes Kany-Turpin José. Paris : Flammarion, 1997.

Références et sources bibliographiques

- Mazzucchelli G. Gli scrittori d'Italia cioè notizie storiche, e critiche intorno alle vite, e agli scritti dei letterati italiani del conte Giammaria Mazzucchelli bresciano. Brescia : presso a Giambatista Bossoni, 1753-1763.
- Milhaud G. *Nouvelles études sur l'histoire de la pensée scientifique*. Paris : F. Alcan, 1911.
- Milne-Edwards H. *Leçons sur la physiologie : et l'anatomie comparée de l'homme et des animaux*. Paris : Masson, 1857.
- Moleschott J. L'unité de la vie. Traduit de l'italien par Odysse-Barot. *Revue des cours scientifiques de la France et de l'étranger*. Paris : Germer Baillière, libraire-éditeur, 1863-1864.
- Montucla J.-E. *Histoire des mathématiques : dans laquelle on rend compte de leurs progrès depuis leurs origines jusqu'à nos jours*. Paris : A. Jombert, 1758.
- Parent A. *Essais et recherches de mathématique et de physique*. Paris : chez Jean de Nully, 1713.
- Perrault C. *Description anatomique d'un caméléon, d'un castor, d'un dromadaire, d'un ours et d'une gazelle*. Paris : Léonard, 1669.
- Perrault C. *Essais de physique ou recueil de plusieurs traités touchant les choses naturelles*. Paris : J. B. Coignard, 1680-1684.
- Pettigrew J. B. *La locomotion chez les animaux, ou Marche, natation et vol, suivie d'une dissertation sur l'aéronautique*. Paris : G. Baillière, 1874.
- Pline l'ancien. *Histoire Naturelle*. [vers 77]. Edition d'Emile Littré. Paris : Dubrochet, 1848-1850.
- Poisson S. D. *Traité de mécanique*. Paris : Bachelier 1833, tome II : 759-761.
- Renouard P. V. *Histoire de la médecine depuis son origine jusqu'au XIX^e siècle*. Tome 1. Paris : J.-B. Baillière, 1816.
- Richet C. *Harvey. La circulation du sang. Des mouvements du cœur chez l'homme et chez les animaux. Deux réponses à Riolan*. [1628]. Paris : G. Masson, 1879.
- Ruini C. *Anatomia del cavallo, infermita et suoi rimedii*. Venise : G. Bindoni, 1599.
- Roulin F.-D. *Propositions sur les mouvements et les attitudes de l'homme*. Paris : Didot Jeune, 1820.
- Santorio Santorio. *De statica medicina et de responsione ad Staticomasticem ars : aphorismorum sectionibus-octo comprehensa*. Lugduni : Sumptibus Antonii Cellier, 1690.
- Santorio Santorio. *Medicina statica, being the aphorisms of Sanctorius, translated into English, with large explanations*. [traducteur John Quincy], London : J. Osborn, 1728.
- Sighart J. *Albert Le Grand : sa vie et sa science d'après les documents originaux*. Traduit de l'allemand par un religieux. Paris : librairie de Mme Poussielgue-Rusand, 1862.
- Société de gens de lettres. *Biographie universelle, ancienne et moderne*. Paris : chez Michaud Frères, libraires, 1812.
- Taton R. *La science antique et médiévale. Des origines à 1450*. Paris : Presses Universitaires de France, 1957.
- Thompson D. W. *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1917.
- Toussnel A. *L'esprit des bêtes : vénerie française et zoologie passionnelle*. Paris : librairie Sociétaire, 1847.
- Trabaud J. *Principes sur le mouvement et l'équilibre pour servir d'introduction aux Mécaniques & à la Physique*. Paris : chez Jean Desaint & Charles Saillant Libraires, 1741.
- Treviranus G. R. *Biologie : oder Philosophie der lebenden Natur für Naturforscher und Aerzte*. Göttingen : bey J. F. Röwer, 1802, 1 : 4.

Références et sources bibliographiques

- Varignon P. *Projet d'une nouvelle Mécanique avec un Examen de l'opinion de M. Borelli, sur les propriétés des Poids suspendus par des Cordes*. Paris : Veuve d'Edme Martin, Jean Boudot, & Estienne Martin, 1687.
- Ver Eecke P. *Les œuvres complètes d'Archimède. Suivies des commentaires d'Eutocius d'Ascalon*. Liège : Vaillant-Carmanne, 1960.
- Vésale A. *Les portraits anatomiques de toutes les parties du corps humain... ensemble, l'abrégé d'André Vésale et l'explication d'iceux, accompagnée d'une déclaration anatomique*. [1569]. Paris : BIUM, 2004 Paris : chez André Wechel.
- Virey J. J. *Histoire des mœurs et de l'instinct des animaux*. Paris : libraire Deterville, 1822.
- Vitruve. *De l'architecture*. Traduction nouvelle de M. Ch.-L. Maufras. Paris : C. L. F. Panckoucke, 1847.
- Weber G., Weber E. *Traité de la mécanique des organes de la locomotion*. [Quatrième partie : Aperçu historique des recherches anciennes sur la marche et la course]. In Bischoff G.-T. et coll. *Encyclopédie Anatomique, Tome II. Ostéologie, syndesmologie*. Paris : J.-B. Baillière, 1843 : 492-518.
- Weber W. E., Weber E. *Mechanics of the human walking apparatus*. [1825]. Traduction de la version originale de *Mechanik der menschlichen gehwerkzeuge* par P. Maquet and R. Furlong (trans.). Berlin : Springer-Verlag, 1992.

RÉSUMÉ

Ce travail de synthèse, s'articule en quatre parties, autour d'auteurs et d'œuvres majeures, qui marquent de leurs références les époques et constituent le moyen de suivre par leurs filiations épistémologiques et historiques, entre éclectisme et organon, les concepts, les théories et les méthodes, la compréhension de l'étude du mouvement, et notamment la locomotion selon une perspective biomécanique.

Ces études s'échelonnent au cours d'une difficile odyssée qui pourrait commencer depuis le petit traité d'Aristote sur la *Marche des Animaux*. L'interprétation de la locomotion se situe dans un encyclopédisme zoologique culturel à la croisée de plusieurs modes de pensée et de systématisation des sciences, combinant déjà une démarche anatomo-fonctionnelle biologique avec une vision mécanique du mouvement. La méthode se réfère déjà à des notions et des principes, utilisés ou supposés, comme : le repère spatial, les points d'appui, la répartition des masses, le centre d'inertie et de gravité, les modes de déplacement en flexion et extension ou traction et poussée, qui restent toujours d'actualité dans l'explication de l'étude des mouvements.

C'est à la fin du XVII^e siècle qu'un disciple de Galilée, Giovanni Alfonso Borelli, analyse l'économie animale en se référant au patrimoine scientifique de ses prédécesseurs sur les lois de la statique, de l'hydraulique, des mathématiques, mais aussi des connaissances anatomiques et physiologiques, pour rédiger l'œuvre de sa vie, le *De Motu animalium*. Illustrant ses propositions de nombreuses figures, il démontre que les os s'actionnent selon la mécanique du système des leviers (appui, longueur du segment, résistance, force) dont les muscles représentent des puissances mal agencées, engendrant d'énormes déperditions de forces, qu'il s'efforce de calculer et de chiffrer au cours de différentes postures et quelques mouvements. Malgré, l'imprécision des calculs iatromathématiques, sa démarche a valeur d'étape et d'exemple, car génératrice de curiosités et d'intérêts critiques.

Plusieurs siècles après, *La machine animale* de Marey, publiée en 1873, révèle encore des filiations récurrentes avec le courant iatromécanique. Sa passion pour l'ingénierie et la physiologie guide sa logique matérialiste sur de nouveaux champs disciplinaires dont les passerelles élèvent le niveau conceptuel et théorique. Il s'intéresse aux estimations de l'efficacité et du rendement des moteurs animés depuis les lois de l'économie d'énergie et du travail qui le guide à la biomécanique. D'autres auteurs, plus récents, McNeill Alexander, Bejan... selon de nouveaux modèles cohérents, enrichissent cette vision pluridisciplinaire et multiculturelle pour élaborer des modélisations de plus en plus rigoureuses et globalisantes.

L'évolution des performances sportives représente le champ de recherche qui montre au mieux, l'influence et les progrès de la technologie dans l'optimisation de l'étude du mouvement. Les quelques exemples appliqués et évoqués, révèlent la quête du sens dans les variables étudiées, elle interpelle toujours par filiation éclectique la sémiotique de l'argumentation aristotélicienne, la iatromathématique Borellienne, l'ingénierie physiologique de Demeny et Marey et d'autres multiples théories et modélisations physico-mathématiques dont l'histoire des sciences est riche.

Les recherches historiques sur les théories explicatives de la locomotion expriment, et cela de manière récurrente, quels que soient les contextes et les paradigmes scientifiques biologiques interprétatifs, que le matérialisme se heurte au caché insaisissable. Le mystère de la vie transparait dans ce qui se meut et les méthodes de quantification donnent sens à l'intensité et l'efficacité du vivant. Les multiples courants de pensée, autrefois d'appellation physiologique et physique puis iatrochimique et iatromathématique, il y a peu encore biologique et biomécanique s'intitulent aujourd'hui neurophysiologie et neurobiomécanique pour s'intéresser toujours aux mouvements, indirectement aux paramètres de la connaissance de la maîtrise de la vie pour son prolongement, mais toujours avec sa part d'insoupçonnée.

Mots-clés : éclectisme, épistémologie, histoire, locomotion, mouvement, science, technique.