



SCIENCE EXPÉRIMENTALE ET CONNAISSANCE DU VIVANT

LA MÉTHODE ET LES CONCEPTS

■ **Pierre VIGNAIS**

avec la collaboration de **Paulette VIGNAIS**



**SCIENCE EXPÉRIMENTALE
ET CONNAISSANCE DU VIVANT
LA MÉTHODE ET LES CONCEPTS**

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences poursuit un triple objectif :

- ▶ réaliser des ouvrages correspondant à un projet clairement défini, sans contrainte de mode ou de programme,
- ▶ garantir les qualités scientifique et pédagogique des ouvrages retenus,
- ▶ proposer des ouvrages à un prix accessible au public le plus large possible.

Chaque projet est sélectionné au niveau de Grenoble Sciences avec le concours de referees anonymes. Puis les auteurs travaillent pendant une année (en moyenne) avec les membres d'un comité de lecture interactif, dont les noms apparaissent au début de l'ouvrage. Celui-ci est ensuite publié chez l'éditeur le plus adapté.

(Contact : Tél. : (33)4 76 51 46 95 - E-mail : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr)

Deux collections existent chez EDP Sciences :

- ▶ la *Collection Grenoble Sciences*, connue pour son originalité de projets et sa qualité
- ▶ *Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques*, collection présentant des thèmes de recherche d'actualité, traités par des scientifiques de premier plan issus de disciplines différentes.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

Comité de lecture pour Science expérimentale et connaissance du vivant

- ▶ **Michel BORNENS**, Directeur de recherche CNRS à l'Institut Curie, Paris
- ▶ **Athel CORNISH-BOWDEN**, Directeur de recherche CNRS, Marseille
- ▶ **Roland DOUCE**, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble
- ▶ **Françoise FRIDLANSKY**, Chargée de recherche CNRS, Gif-sur-Yvette
- ▶ **Jean-Louis MARTINAND**, Professeur à l'ENS, Cachan
- ▶ **Jean-Claude MOUNOLOU**, Professeur à l'Université Paris-Sud, Orsay
- ▶ **Valdur SAKS**, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble
- ▶ **Michel SATRE**, Directeur de recherche CNRS au CEA, Grenoble
- ▶ **Michel SOUTIF**, Professeur honoraire à l'Université Joseph Fourier, Grenoble
- ▶ **Jean VICAT**, Professeur honoraire à l'Université Joseph Fourier, Grenoble
- ▶ **Jeannine YON-KAHN**, Directeur de recherche CNRS, Orsay

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du **Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche** et de la **Région Rhône-Alpes**.
Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble**.

Réalisation et mise en pages : **Centre technique Grenoble Sciences**

Illustration de couverture : **Alice GIRAUD**

(d'après : © CNRS Photothèque : Motoneurone facial de rat en culture organotypique – T. LAUNEY / J.P. GUERITAUD ; Neurone du cortex du rat ; Fluorescence de la "green fluorescent protein" – Y. BAILLY ; Structure atomique du prion de levure – R. MELKI ; Cristaux de virus des Triatomines – M. BECKER • © N. FRANCESCHINI : Tête vue de face, montrant les yeux composés de la mouche domestique • © N. FRANCESCHINI et C. BLANES : "Robot-mouche" • © Académie Nationale de Médecine : Extrait de "Claude BERNARD et ses élèves", tableau de Léon-Augustin LHERMITTE)

ISBN 2-86883-897-9

© EDP Sciences, 2006
Extrait de la publication

**SCIENCE EXPÉRIMENTALE
ET CONNAISSANCE DU VIVANT
LA MÉTHODE ET LES CONCEPTS**

Pierre VIGNAIS

avec la collaboration de **Paulette VIGNAIS**



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France
Extrait de la publication

Ouvrages Grenoble Sciences édités par EDP Sciences

Collection Grenoble Sciences

Chimie. Le minimum à savoir (*J. Le Coarer*) • Electrochimie des solides (*C. Déportes et al.*) • Thermodynamique chimique (*M. Oturan & M. Robert*) • CD de Thermodynamique chimique (*J.P. Damon & M. Vincens*) • Chimie organométallique (*D. Astruc*) • De l'atome à la réaction chimique (*sous la direction de R. Barlet*)

Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Mécanique statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J.P. Franc et al.*) • La turbulence (*M. Lesieur*) • Magnétisme : I Fondements, II Matériaux et applications (*sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie*) • Du Soleil à la Terre. Aéronomie et météorologie de l'espace (*J. Liliensten & P.L. Blelly*) • Sous les feux du Soleil. Vers une météorologie de l'espace (*J. Liliensten & J. Bornarel*) • Mécanique. De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • La mécanique quantique. Problèmes résolus, T. 1 et 2 (*V.M. Galitsky, B.M. Karnakov & V.I. Kogan*) • Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales (*J. Sivardière*) • Symétrie et propriétés physiques. Du principe de Curie aux brisures de symétrie (*J. Sivardière*)

Exercices corrigés d'analyse, T. 1 et 2 (*D. Alibert*) • Introduction aux variétés différentielles (*J. Lafontaine*) • Mathématiques pour les sciences de la vie, de la nature et de la santé (*F. & J.P. Bertrandias*) • Approximation hilbertienne. Splines, ondelettes, fractales (*M. Attéia & J. Gaches*) • Mathématiques pour l'étudiant scientifique, T. 1 et 2 (*Ph.J. Haug*) • Analyse statistique des données expérimentales (*K. Protassov*) • Nombres et algèbres (*J.Y. Mérindol*) • Analyse numérique et équations différentielles (*J.P. Demailly*)

Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques (*J. Pelmont*) • Enzymes. Catalyseurs du monde vivant (*J. Pelmont*) • Endocrinologie et communications cellulaires (*S. Idelman & J. Verdetti*) • Eléments de biologie à l'usage d'autres disciplines (*P. Tracqui & J. Demongeot*) • Bioénergétique (*B. Guérin*) • Cinétique enzymatique (*A. Cornish-Bowden, M. Jamin & V. Saks*) • Biodégradations et métabolismes. Les bactéries pour les technologies de l'environnement (*J. Pelmont*) • Enzymologie moléculaire et cellulaire, T. 1 et 2 (*J. Yon-Kahn & G. Hervé*)

La plongée sous-marine à l'air. L'adaptation de l'organisme et ses limites (*Ph. Foster*) • L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*) • La biologie, des origines à nos jours (*P. Vignais*) • Naissance de la physique. De la Sicile à la Chine (*M. Soutif*) • Le régime oméga 3. Le programme alimentaire pour sauver notre santé (*A. Simopoulos, J. Robinson, M. de Lorgeril & P. Salen*) • Gestes et mouvements justes. Guide de l'ergomotricité pour tous (*M. Gendrier*)

Listening Comprehension for Scientific English (*J. Upjohn*) • Speaking Skills in Scientific English (*J. Upjohn, M.H. Fries & D. Amadis*) • Minimum Competence in Scientific English (*S. Blattes, V. Jans & J. Upjohn*)

Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques

Radiopharmaceutiques. Chimie des radiotraceurs et applications biologiques (*sous la direction de M. Comet & M. Vidal*) • Turbulence et déterminisme (*sous la direction de M. Lesieur*) • Méthodes et techniques de la chimie organique (*sous la direction de D. Astruc*) • L'énergie de demain. Techniques, environnement, économie (*sous la direction de J.L. Bobin, E. Huffer & H. Nifenecker*) • Physique et biologie. Une interdisciplinarité complexe (*sous la direction de B. Jacrot*)

AVANT-PROPOS

Le *Novum Organum* de Francis BACON, le *Skeptical Chemist* de Robert BOYLE et le *Discours de la Méthode* de René DESCARTES restent les témoins de la révolution scientifique qui, au XVII^e siècle, réveilla l'Occident d'un long endormissement. Dans leurs ouvrages respectifs, les auteurs insistaient sur le rôle de la méthode expérimentale dans l'exploration des lois de la Nature, c'est-à-dire sur la façon de concevoir une expérience, de mener à son terme sa réalisation grâce à des techniques fiables et d'en tirer des conclusions en se limitant aux seuls résultats avec leurs marges d'erreur, en faisant fi des traditions et des préjugés en cours. Deux siècles plus tard, Claude BERNARD dans l'*Introduction à l'Etude de la Médecine Expérimentale* rédigea un ardent plaidoyer pour l'application de la méthode expérimentale à l'étude des fonctions des êtres vivants. Fertilisée par des techniques hautement sophistiquées, héritées de la physique et de la chimie, dotée d'un savoir-faire toujours plus performant dans la manipulation du génome, acquise aux procédures de l'informatique, enrichie de connaissances fondamentales qui ne cessent de s'accumuler, la biologie du XXI^e siècle est parfois oublieuse de ses racines. A notre époque où la bioingénierie triomphante est reconnue comme le sésame qui ouvre toutes grandes les portes du temple du vivant, il peut être salutaire pour l'étudiant et le jeune chercheur de faire un retour sur le passé et de considérer avec respect ce qu'en d'autres temps des savants inspirés réalisèrent avec des moyens fort modestes, parfois dérisoires au vu de la technologie contemporaine. Il peut leur être bénéfique de reconnaître que l'échafaudage harmonieux des connaissances actuelles s'est édifié sur le socle solide des découvertes fondatrices faites par d'illustres anciens. Il peut être enrichissant de se souvenir que d'audacieuses innovations fondées sur des évidences expérimentales se sont heurtées en leur temps à la vindicte d'un public mal préparé, mal informé, attaché à une routine sans issue. Il n'est que de rappeler qu'au XIX^e siècle l'introduction, dans la pratique chirurgicale, des méthodes d'asepsie et d'antisepsie qui se fondaient sur la preuve acquise de l'existence de germes infectieux ne fut pas de tout repos.

Le présent ouvrage relate les circonstances qui, au cours du temps, ont conduit les savants et les philosophes à s'interroger sur la Nature vivante, à oser l'explorer par des artifices expérimentaux et à poser des balises pour éviter de tomber dans des chausse-trappes préjudiciables au progrès scientifique. En m'appuyant sur des exemples concrets se rapportant à des expériences faciles à appréhender, mon intention a été de fournir au lecteur une matière à réflexion non seulement sur la méthode expérimentale, sur son histoire et son rôle dans l'analyse objective des mécanismes du vivant mais aussi sur l'organisation de la science de nos jours et sur le regard qu'y porte la société.

Aux responsables des Administrations qui programment la science à travers d'ambitieux projets, aux politiques qui décident des budgets en fonction d'impacts sociétaux fortement médiatisés, l'histoire de la science expérimentale apporte la preuve que c'est souvent par des chemins détournés, peu engageants, non par de larges avenues pleines d'attraits, non par une soumission aveugle à un conformisme apparemment de bon aloi, que la curiosité et l'obstination du chercheur mènent à des découvertes majeures, que des programmes savamment concoctés dans des buts utilitaires aboutissent parfois à des échecs cuisants et engendrent la plupart du temps de graves désillusions, qu'enfin la créativité scientifique procède d'une activité de l'esprit humain qui ne supporte pas d'ingérences contraignantes sous peine d'être stérilisée. L'histoire de la science expérimentale est aussi là pour mettre en évidence le fait qu'une percée scientifique est généralement le fruit d'une patiente élaboration qui ne s'accommode pas du court terme, qu'enfin la formation du chercheur scientifique passe par un long apprentissage auprès de maîtres compétents capables de transmettre des méthodes rigoureuses de travail, de stimuler la curiosité et de donner le goût du risque d'aller vers l'inconnu.

REMERCIEMENTS

Tout écrit requiert une évaluation par des experts reconnus ; celui-ci n'a pas dérogé à l'usage. Je tiens ici à exprimer ma reconnaissance à celles et ceux de mes collègues qui ont accepté d'être juges et d'apporter leurs suggestions et leurs critiques : Jeannine YON-KHAN, Françoise FRIDLANSKY, Michel BORNENS, Athel CORNISH-BOWDEN, Roland DOUCE, Jean-Louis MARTINAND, Jean-Claude MOUNOLOU, Valdur SAKS, Michel SATRE, Michel SOUTIF et Jean VICAT. Un grand merci à Jean BORNAREL, directeur scientifique de Grenoble Sciences, pour son aide, ses suggestions ainsi que pour son appui à la patiente élaboration du manuscrit. Dans ce long processus, Nicole SAUVAL a été une cheville ouvrière particulièrement efficace. Sylvie BORDAGE et sa collaboratrice Julie RIDARD ont géré avec maîtrise la mise en forme finale de l'édition et Alice GIRAUD a apporté une touche d'originalité dans la présentation de la couverture. Je ne saurais oublier ceux qui au tout début alors que le manuscrit était encore à l'état de brouillon, m'ont fait l'amitié de le lire et de me faire part de leurs impressions : Isabelle GEAHEL pour ses commentaires souvent directs et toujours judicieux, Jean GASQUET pour son souci de la forme grammaticale, Gérard KLEIN pour ses discussions éclairées et pleines de bon sens sur la science d'aujourd'hui, Eric VADOT pour ses remarques perspicaces et riches en détails sur la culture antique, Alexandra FUCHS pour ses avis pertinents et professionnels en ce qui concerne la biologie du futur ainsi que Flavio DELLA SETA pour sa participation à l'iconographie du chapitre IV. Cet ouvrage est le fruit d'une collaboration de tous les instants avec Paulette VIGNAIS ; il doit d'exister à la vertu interactive de cette collaboration.

INTRODUCTION

"L'esprit humain, aux différentes périodes de son évolution, a passé successivement par le sentiment, la raison et l'expérience. D'abord le sentiment, seul s'imposant à la raison, créa les vérités de la foi, c'est-à-dire la théologie. La raison devenant ensuite maîtrisée, enfanta la scolastique. Enfin l'expérience, c'est-à-dire l'étude des phénomènes naturels, apprit à l'homme que les vérités du monde extérieur ne se trouvaient pas formulées au premier abord, ni dans le sentiment, ni dans la raison. Ce sont seulement des guides indispensables, mais pour obtenir ces vérités, il faut nécessairement descendre dans la réalité objective des choses avec leur forme phénoménale. C'est ainsi qu'apparaît, par le progrès naturel des choses, la méthode expérimentale qui résume tout et s'appuie successivement sur les trois branches de ce triépied immuable, le sentiment, la raison et l'expérience."

Claude BERNARD

Introduction à l'Etude de la Médecine Expérimentale - 1865

Expérimenter, c'est interroger la Nature par des artifices, dans des conditions telles qu'on en maîtrise les paramètres et avec des résultats reproductibles. C'est assembler les résultats obtenus et juger s'ils valident l'hypothèse qui a présidé à l'expérimentation. Cette expérimentation est toujours associée à l'idée qui l'a suscitée. Elle se déroule dans un cadre méthodologique précis avec des règles bien établies et utilise des instruments appropriés. Cette approche de la connaissance de la Nature a été baptisée **Méthode expérimentale**. Appliquée au vivant, son ambition est de décrypter les mécanismes qui président aux fonctions des organes et de leurs cellules, en bref, de déchiffrer les lois de la Nature.

La méthode expérimentale dans les Sciences de la Vie est née en Europe au XVII^e siècle. Son acte de naissance est attesté par la découverte de la circulation du sang par William HARVEY. Pratiquement à la même époque, la méthode expérimentale s'impose dans les sciences physiques avec la mise en évidence du mouvement uniformément accéléré par GALILÉE et la démonstration de l'existence du vide par Blaise PASCAL et Robert BOYLE. Une naissance aussi tardive ne manque pas de surprendre. Dans *Le Chaudron de Médée*, l'épistémologue Mirko GRMEK nous rappelle son étonnement lorsqu'au début de ses études médicales il apprit que la circulation du sang n'avait été découverte qu'en 1628. "J'imaginai, écrit-il, que si j'étais né dans le monde antique, j'aurais découvert sans grande difficulté que le sang circule dans les vaisseaux de l'Homme et des animaux supérieurs. Prétention trompeuse, car il eût fallu que je naisse dans le passé avec l'éducation de l'enfant moderne."

Si la méthode expérimentale appliquée à la connaissance du vivant n'est apparue qu'au XVII^e siècle, il n'en est pas moins vrai que des expérimentations sur l'animal furent pratiquées bien auparavant. Cependant, ces expérimentations ne furent pour la plupart que sporadiques, sans conséquence majeure. Certaines, mal conduites ou mal interprétées, conduisirent, du fait d'arguments fallacieux, à des doctrines erronées qui se perpétuèrent pendant des siècles. Il est tout aussi vrai que la méthode expérimentale emprunta beaucoup à la démarche logique des philosophes de la Grèce antique capables de concevoir des hypothèses, de bâtir des raisonnements ou de réfuter des arguments. L'origine de l'Univers, les mouvements des astres dans le ciel, les principes qui animent la vie animale ou végétale avaient été autant de sujets de réflexion de l'humanité pensante depuis la plus haute Antiquité. Les premières explications qui en furent données faisaient appel au merveilleux. Elles faisaient intervenir des cohortes de divinités bienfaisantes ou malfaisantes. C'est au début du VI^e siècle avant J.C. que se dessine, avec les philosophes grecs, une transition dans les modes de pensée et qu'apparaissent de nouveaux concepts qui conduisent à formuler de nouvelles questions. A une réflexion fondée essentiellement sur l'intervention divine dans l'ordonnement de l'Univers et le destin des hommes se substitue une philosophie rationnelle fondée sur une approche mécaniste des phénomènes observables, sans pour autant se départir de la tradition théogonique.

Les philosophes grecs bénéficièrent d'un vocabulaire, d'une syntaxe et d'une écriture capables de décrire leurs observations sur le monde qui les entourait et leur était accessible par les sens et d'exprimer leurs idées sur celui de la métaphysique. Alors que les peuples de la haute Antiquité, tels les Sumériens, utilisaient des signes spéciaux sur des tablettes en argile pour représenter des objets, par exemple un épi pour désigner le blé, une tête avec des cornes pour désigner un bœuf, les Grecs firent usage d'un alphabet où les lettres étaient traduites par des signes conventionnels qui avaient leurs équivalents dans des sons. Une écriture alphabétique avec son équivalence phonétique ainsi qu'une syntaxe rigoureuse et une grande fertilité dans la dérivation des mots, tout cet ensemble facilita non seulement les communications entre les lettrés de l'époque, mais aussi l'émergence de **concepts** abstraits et d'une pensée aux nuances subtiles. Les spéculations des philosophes grecs sur les phénomènes de la Nature, sur la structure de l'Univers, sur la notion de vie et de fonctions vitales seront reprises au Moyen Âge : ARISTOTE et THÉOPHRASTE qui avaient été des observateurs de la faune et de la flore et les initiateurs des premières classifications des êtres de la Nature fondées sur une logique seront retrouvés quinze siècles plus tard.

Les alchimistes médiévaux furent des techniciens certes habiles, mais souvent habités par des idées chimériques. Pour beaucoup d'entre eux, l'expérimentation ne s'appuyait sur aucune théorie logique et visait essentiellement à la réalisation de rêves extravagants, tels que la transmutation de métaux en or ou la création d'une panacée à usage médical. Pour d'autres, l'alchimie n'avait qu'une valeur symbo-

lique. Alors que la science médiévale en Occident progressait avec une désespérante lenteur, à l'autre bout du monde, la Chine connaissait des progrès techniques stupéfiants avec les inventions du papier, de la typographie, de la poudre, de la boussole, entre autres, inventions dont l'Europe se dotera bien plus tard. Mais, tandis que dans un brutal sursaut intellectuel et culturel, l'Occident allait inventer au XVII^e siècle la méthode expérimentale afin de comprendre les phénomènes de la Nature, la science chinoise, de ce point de vue, resta en retrait.

Les premières Universités apparaissent en Occident à la fin du XIII^e siècle. Elles essaient rapidement dans toute l'Europe. En l'an 1500, elles étaient une cinquantaine. L'enseignement qui y était initialement donné s'appuyait sur des écrits bibliques ; on y commentait aussi les ouvrages des philosophes grecs parmi lesquels ARISTOTE tenait une place privilégiée. Dès le XIII^e siècle, deux personnages originaux et éminents, Robert GROSSETESTE et Roger BACON, tous deux de l'ordre des Franciscains, s'interrogent sur la valeur d'un enseignement accepté sans critique et s'attachent à reconnaître la valeur du fait expérimental contre toute idée préconçue. Leur attitude contestataire prélude à un courant d'idées neuves semé de doutes et d'interrogations.

Au milieu du XVI^e siècle, une première révolution scientifique s'annonce en Occident, marquée par le renouveau de l'astronomie et une date repère, 1543, celle de la publication du *De Revolutionibus Orbium Cælestium* par Nicolas COPERNIC : la Terre n'est plus au centre du Monde, elle tourne autour du Soleil. Coïncidence remarquable, en 1543, VÉSALE publie son célèbre traité d'anatomie humaine *De humani corporis fabrica*. Cette révolution, dont la cosmologie et l'anthropologie avaient été les supports, s'amplifie dans le cours du XVII^e siècle, irriguant les sciences de la physique et du vivant. En bref, jusqu'à la Renaissance, la science était restée essentiellement empirique. Elle répondait au terme grec ἐμπειρία qui se traduit aussi bien par empirisme que par expérience, mais une expérience fondée sur l'observation de phénomènes répétés dont les causes produisent les mêmes effets.

A partir du XVI^e siècle, le terme **expérience** revêt une signification élargie où les phénomènes observés sur le vivant sont provoqués par l'expérimentateur. Consciente de la puissance directrice de la méthode expérimentale, la science de la nature, en accédant au statut de **science expérimentale**, se départit de l'enseignement scolastique médiéval et se dégage de l'esprit fumeux des pratiques secrètes d'une alchimie qui mélangeait magie et astrologie. L'approche expérimentale, nouvelle et audacieuse, de la mécanique permet la découverte des lois du mouvement, marquant une totale rupture avec la physique aristotélicienne. Par analogie, certains phénomènes propres au vivant, comme la circulation du sang chez l'homme et les réflexes nerveux, sont expliqués sur la base de concepts mécanistes. L'enthousiasme pour la philosophie **mécaniste** devient rapidement démesuré. On regarde l'animal comme une machine faite de tuyaux, de leviers, de ressorts. En contrepoint, l'alchimie toujours vivace au XVII^e siècle alimente une philosophie

animiste de la Nature, en opposition avec la philosophie mécaniste qui tendait à s'imposer. Plus tard, le terme animisme fera place au terme **vitalisme**, un concept relativement similaire où l'âme est remplacée par un principe vital. Ce principe vital prétendra expliquer l'ensemble des fonctions physiologiques.

Quelque peu en retard sur les sciences physiques et les sciences du vivant, les sciences chimiques allaient vivre, à la fin du XVIII^e siècle, une révolution décisive avec la réfutation de la théorie du phlogistique. Le passage du qualitatif au quantitatif dans l'étude de l'animal ou du végétal se fit lorsque les progrès de la chimie permirent de traduire en termes d'équations équilibrées les modifications imposées à des espèces moléculaires par le jeu des métabolismes. Le XIX^e siècle apparaît comme l'époque florissante et triomphante de la physiologie expérimentale de l'*in vivo*. Le bénéfice que l'étude des sciences du vivant retire de l'utilisation de techniques héritées de la physique et de la chimie démontre l'efficacité de compétences se rattachant à des horizons différents.

Du fait d'une accumulation quasi exponentielle des découvertes au XIX^e siècle, la connaissance scientifique commence à se compartimenter. Changeant d'étiquette, avec le nouveau label de **biologie** dont elles s'habillent, les sciences du vivant prétendent à un nouveau statut. La chimie s'individualise de la physique. La mathématique survole l'ensemble. L'éclectisme du monde savant, caractéristique du XVII^e siècle, s'efface et laisse place à un approfondissement du détail dans des secteurs bien délimités. Des progrès considérables au plan technique sont accomplis avec l'invention et la mise au point de nouveaux instruments et de nouvelles méthodes d'exploration. En phase avec le progrès technique, des concepts nouveaux, souvent inattendus, émergent. Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, en l'espace de quelques décennies, les lois de la transmission des caractères héréditaires sont découvertes ; le principe de l'évolution des êtres vivants, sur la base d'une sélection naturelle, est théorisé ; la théorie cellulaire explique que la cellule est l'unité structurale et fonctionnelle de tous les tissus. D'une biologie dont les deux principaux axes étaient l'**anatomie** et la **physiologie** émergent et s'imposent comme des disciplines majeures des secteurs jusqu'alors à peine reconnus comme la **génétique**, l'**embryologie** et la **biochimie**, ou même inexistantes comme la **microbiologie** et l'**immunologie**.

Au tournant du XX^e siècle, l'exploration du vivant se déplace de l'*in vivo* à l'*in vitro* avec l'utilisation d'organes perfusés, d'homogénats cellulaires, d'organites endocellulaires. Les grandes voies du métabolisme sont identifiées et le déroulement de réactions enzymatiques dans des compartiments de la cellule est précisé. Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, on assiste à l'éclosion puis à l'expansion fulgurante de la **biologie moléculaire**, issue d'une fusion entre la biochimie et la génétique. Le modèle expérimental passe du cellulaire au moléculaire. Aidée par des techniques qui relèvent des sciences de l'ingénieur, la **biologie structurale** s'adresse à l'anatomie des macromolécules du vivant, au niveau atomique. La structure tridimensionnelle de milliers de ces macromolécules, en particulier de protéines, est déter-

minée et répertoriée, donnant lieu à des comparaisons et à des classifications en familles et à l'élaboration d'arbres phylogénétiques qui reflètent le processus de l'évolution. Le décryptage de la séquence du génome humain, un objectif jugé chimérique par certains lorsqu'il fût envisagé dans les dernières décennies du XX^e siècle, devient une réalité. Fort d'un attirail d'outils de plus en plus performants, le **génie génétique** qui consiste à "bricoler" les gènes s'impose comme une technologie obligatoire pour nombre d'expérimentateurs en biologie.

L'explosion des données sur les gènes de nombreuses espèces animales et végétales et sur les protéines issues de l'expression de ces gènes a conduit à individualiser de nouveaux pans de la biologie sous les vocables de **génomique** et de **protéomique**. Les applications en sont multiples dans des domaines qui touchent directement à la vie de la société. En sont bénéficiaires la médecine avec de nouvelles possibilités dans le diagnostic et le pronostic de maladies, la pharmacologie avec la création de nouveaux médicaments, l'agriculture et l'élevage avec l'application de nouvelles connaissances en génétique, voire certains domaines de l'industrie. C'est ainsi qu'au début du XXI^e siècle, le **paradigme de la méthode expérimentale** dans les sciences du vivant se trouve **déplacé**. D'une démarche où l'on recherchait la réponse d'une cellule ou d'un organe à la variation d'un seul paramètre, on passe à une démarche qui implique une étude globalisée, multiparamétrique, accompagnée d'une modélisation dont l'ambition est de simuler la dynamique cellulaire. Cette nouvelle tendance s'appuie sur l'essor récent des **biotechnologies**. Du fait de leurs immenses possibilités et de leurs retombées dans le domaine public, atteignant parfois les individus dans leur vie privée, les biotechnologies suscitent des débats passionnés, où la science se trouve confrontée à la société humaine. Avec les biotechnologies, les sciences de l'ingénieur font une entrée massive dans le domaine de la biologie. Leur génie inventif sollicite la mise en œuvre de problématiques à la découverte des mécanismes du vivant, en adéquation avec des techniques et des instruments dominés par la miniaturisation, l'informatique et la robotique. **Découverte** et **invention** requièrent des modes de pensée et des talents spécifiques qui impérativement doivent se compléter et s'épauler.

Au regard de la progression foudroyante, parfois chaotique de la connaissance scientifique durant les cinq derniers siècles, on est amené à se demander quels furent les facteurs déclenchants qui permirent à un moment précis, dans le monde occidental d'inventer et de diffuser une approche logique et objective pour explorer les énigmes de la Nature. Cette nouvelle approche est la **méthode expérimentale**. Quels furent les événements qui présidèrent à sa naissance ? Y eut-il une influence du contexte social, politique ou religieux ? L'énergie de quelques individus fut-elle suffisante pour initier une telle révolution ? Ou bien faut-il en rechercher l'origine dans un lointain passé de réflexions philosophiques ? Autant de questions qui en appellent à réfléchir sur la façon de "faire la science" dans le temps présent. En ce qui concerne les sciences du vivant, ces questions sont d'autant plus prégnantes que les retombées des découvertes dans le domaine de l'humain ne laissent pas

aujourd'hui d'être interrogées et débattues. En fonction de l'avancement du savoir, de la reconnaissance de son rôle utilitaire et de sa diffusion à grande échelle dans la société, la philosophie qui s'intéressait aux sciences du vivant focalise désormais son attention sur des problèmes d'éthique, touchant particulièrement les fonctions de reproduction que la biologie contemporaine prétend manipuler et modifier. Balottée entre une médiatisation agressive et une nécessaire transparence, soumise à des pressions qui visent à l'utilitaire, l'expérimentation biologique se trouve, de nos jours, à une croisée de chemins, sollicitée d'un côté par une ingénierie toujours plus performante et entreprenante, confrontée de l'autre à des considérations éthiques et socio-économiques. Face à ces interrogations, une réflexion sur le passé s'impose.

Chapitre I

LES RACINES DE LA SCIENCE EXPÉRIMENTALE DE L'ANTIQUITÉ GRECQUE À LA RENAISSANCE

“En la genèse d’une doctrine scientifique, il n’est pas de commencement absolu ; si haut que l’on remonte la lignée des pensées qui ont préparé, suggéré, annoncé cette doctrine, on parvient toujours à des opinions qui, à leur tour, ont été préparées, suggérées et annoncées ; et si l’on cesse de suivre cet enchaînement d’idées qui ont procédé les unes des autres, ce n’est pas qu’on ait mis la main sur le maillon initial, mais c’est que la chaîne s’enfoncé et disparaît dans les profondeurs d’un insondable passé.”

Pierre DUHEM

Le Système du Monde - 1913-1959

La découverte de la **méthode expérimentale** au XVII^e siècle en Occident dut sans doute beaucoup au contexte socioculturel et politico-religieux de l’époque (Chapitre II). Cependant, il serait injuste d’oublier la part d’héritage qui revient à la pensée scientifique et philosophique de l’Antiquité grecque qui, après des siècles d’oubli, fut fortement réactivée dans la dernière partie du Moyen Âge. De même, l’histoire du développement de la chimie moderne et de son application au vivant n’est pas concevable sans une évaluation du savoir technique, hérité des alchimistes médiévaux. En dépit du caractère illusoire de leurs projets – transformer les métaux en or et trouver un remède universel capable de guérir tous les maux –, les alchimistes avaient eu le mérite d’inventer des appareils, de mettre au point des méthodes et, ce faisant, de découvrir des phénomènes qui allaient devenir des sujets de réflexion et d’investigation.

1. LA RATIONALITÉ SCIENTIFIQUE DANS LA GRÈCE ANTIQUE

“Il faut, pour que la culture des sciences soit vraiment féconde, un souffle vivant, un génie d’invention, un instinct qui tient de celui de l’artiste et du poète. Voici ce que les Grecs avaient possédé, ce que les temps modernes ont retrouvé.”

Antoine Augustin COURNOT

Considérations sur la marche des idées et des événements dans les temps modernes - 1872

"Les Grecs ont inventé la science de la nature en recherchant la permanence impersonnelle, intelligible, sous-jacente au monde du changement, et en découvrant l'idée brillante d'un emploi généralisé de la théorie scientifique, ils proposèrent l'idée d'admettre en principe un ordre permanent, uniforme et abstrait, d'où l'on pouvait déduire le monde changeant de l'observation. Les mythes eux-mêmes furent réduits à la condition de théories, leurs entités retaillées selon les exigences de la prédiction quantitative. Avec cette idée, dont leur développement de la géométrie devint le paradigme en lui donnant l'expression la plus précise, la science grecque doit être considérée comme l'origine de tout ce qui a suivi."

Alistair Cameron CROMBIE

Histoire des Sciences de saint AUGUSTIN à GALILÉE - 1958 (traduction française)

Issue au VI^e siècle avant J.C. à partir de foyers disséminés entre l'Asie mineure, le sud de l'Italie et la Sicile, la science grecque, appelée à cette époque philosophie, s'est développée sur une dizaine de siècles. Après s'être installée pendant quelque temps à Athènes elle migra en Egypte et prospéra à Alexandrie. Ces migrations successives correspondent globalement à trois époques dénommées présocratique, classique et alexandrine. Durant ce long espace de temps, les philosophes grecs n'ont cessé de questionner la Nature. Chez eux, l'observation était la règle et l'expérimentation restait épisodique. Cependant, par leur façon de poser des questions judicieuses et de baliser la pensée par la logique de leur raisonnement et la rigueur de leur dialectique, ils méritent d'être crédités de précurseurs de la méthode expérimentale qui émergea en Occident bien plus tard, à la fin de la Renaissance.

1.1. DE THALÈS À SOCRATE

VERS UNE NOUVELLE CONCEPTION DE LA NATURE

L'époque présocratique de la science grecque (600 à 480 avant J.C.) est connue essentiellement à travers des documents doxographiques recueillis plusieurs siècles plus tard. La philosophie présocratique cherchait à expliquer l'Univers en termes rationnels, libérés des mythes ancestraux et du surnaturel. Elle se substituait à celle des Babyloniens, des Phéniciens et des Egyptiens. Il convient, malgré tout, de reconnaître que ces peuples avaient été des précurseurs du savoir. L'**astronomie** qui étudiait le mouvement des planètes fut à l'origine une science babylonienne, l'**arithmétique** une science phénicienne et la **géométrie** une science égyptienne. Les Phéniciens savaient fabriquer le verre ; de même que les Egyptiens ils savaient préparer certaines matières colorantes et ils pratiquaient l'art de la teinture ; ils maîtrisaient quelques-uns des procédés de la métallurgie, une industrie encore dans l'enfance. Pour sa part, le génie grec était plus porté vers des spéculations théoriques que vers l'expérimentation.

La profusion d'hypothèses ingénieuses, formulées par les philosophes présocratiques, leur éclectisme en matière d'intérêt scientifique témoignent de la vitalité spirituelle de cette époque. La première école présocratique grecque fut celle de

Milet, un port de l'Ionie (région occidentale de l'actuelle Turquie) (Figure I.1). A Milet, où transitaient vers l'Occident des marchandises en provenance de l'Orient, différentes civilisations se côtoyaient, s'enrichissant mutuellement dans un climat politique de grande liberté. C'est là que se concrétisèrent, dans des enseignements et des écrits, des tentatives de réponse à des questions qui préoccupaient l'homme pensant depuis des siècles : le mouvement des astres, le cycle des saisons et les changements de la Nature, la naissance, la mort, la signification de la vie... Alors que les sciences babylonienne, phénicienne et égyptienne avaient été utilitaires, s'intéressant pour des raisons économiques à la mesure du temps en déterminant les cycles de la lune, et aux calculs d'arpentage pour délimiter la surface de terrains agricoles, la science grecque rechercha dans l'observation des phénomènes de la Nature une explication au sens de la vie et aux activités qui la caractérisent.

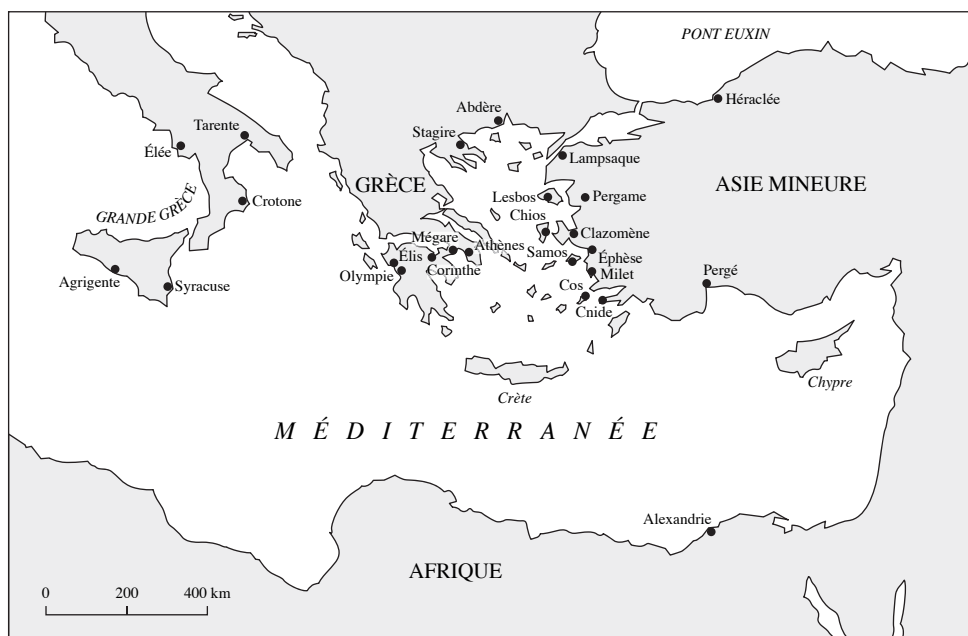


Figure I.1 – Le monde des cités grecques avec ses comptoirs en Asie Mineure, en Sicile et en Italie

C'est à Milet, qu'enseignèrent THALÈS (625 - 550 avant J.C.), ANAXIMANDRE (610 - 545 avant J.C.), disciple de THALÈS et ANAXIMÈNE (580 - 530 avant J.C.), élève d'ANAXIMANDRE. Les **philosophes milésiens** affirmaient que "rien ne vient de rien" et que les choses de la Nature sont issues d'un **principe fondamental unique**, susceptible de transformation, un élément primordial, l'**eau** pour THALÈS, l'**illimité** pour ANAXIMANDRE et l'**air** pour ANAXIMÈNE. Ainsi, malgré la diversité apparente des matériaux du monde, émerge l'idée que ces matériaux se sont construits à partir d'un constituant élémentaire. THALÈS affirmait que la Terre

est portée par l'eau, en se fondant sur le fait qu'une partie de la Terre est immergée et que l'eau est à l'origine d'un cycle dans lequel, pompée sous forme de vapeur par le Soleil, elle retombe en pluie. En fait, le concept d'eau formulé par THALÈS incluait tout matériel liquide, l'eau représentant un cas particulier pouvant adopter un état solide, liquide ou gazeux. L'illimité d'ANAXIMANDRE représentait un indéfinissable idéalisé, porteur de potentialités génératrices de l'eau, de l'air et du feu. On attribue à ANAXIMANDRE l'idée de la courbure de la Terre, ainsi que la première composition d'une carte géographique à l'usage des navigateurs. Pour ANAXIMÈNE, l'air dans les nuages donnait naissance à l'eau, laquelle pouvait se solidifier en glace ou bien s'évaporer une fois portée au feu, accomplissant ainsi un cycle de transformations naturelles. Ce problème de changement, qui reprenait l'idée de THALÈS, fut discuté plus tard par HÉRACLITE (550 - 480 avant J.C.), un philosophe ionien originaire d'Ephèse. Le **feu** avait été choisi par HÉRACLITE comme élément primordial pour sa mobilité et sa fugacité.

Si les choses du monde sont l'objet de changements, les renseignements que l'on tire de leurs observations ne sont-elles pas illusoire ? Déjà se pose le problème du doute expérimental. Les Milésiens s'étaient aussi intéressés à l'origine de l'espèce humaine. Ainsi, ANAXIMANDRE avait avancé l'idée que l'Homme était issu d'espèces animales inférieures. Se démarquant de mythes où la pensée est subjuguée par des récits fabuleux où l'Homme n'est que le témoin passif de phénomènes cosmiques et d'une théogonie où les caprices des divinités influencent le cours des événements de façon arbitraire, les Milésiens avaient osé affirmer que "l'Univers peut être compris et rationalisé à partir de principes fondamentaux" et que les tentatives pour le comprendre exigent du philosophe un **détachement objectif**. Ces idées tout à fait nouvelles avaient germé d'un coup d'un petit groupe d'hommes. Elles constituèrent le fondement d'une philosophie qui, pendant des siècles, allait illuminer l'Antiquité.

Curieusement, alors que naissait la brillante civilisation grecque, à l'autre extrémité de la Terre, en Chine, à l'époque de la dynastie ZHOU, était enseignée la théorie des cinq éléments considérés comme des forces : le bois, le feu, la terre, l'eau et le métal. On pensait que ces éléments pouvaient interagir de façon circulaire, le bois générant le feu, le feu la terre, la terre le métal, le métal l'eau, l'eau le bois. Dans la conception de l'Univers, d'après l'enseignement de CONFUCIUS (VI^e - V^e siècles avant J.C.), l'homme est assimilé à un microcosme constitué des mêmes cinq éléments qui entrent dans la composition du macrocosme.

A la fin du VI^e siècle avant J.C., la prise de possession de l'Ionie par les Perses entraîne un exil des philosophes grecs vers des cités de l'Italie du Sud et de la Sicile. Ce fut le cas de PYTHAGORE (570 - 480 avant J.C.) dont le nom reste entouré d'une légende. C'est à Crotone, dans le sud de l'Italie, que PYTHAGORE fonde, à l'âge de 40 ans, son école. Avec les pythagoriciens émerge un mode de pensée mécaniste, similaire à celui des Milésiens, qui a pour originalité d'être axé sur le calcul et la géométrie. Le fameux théorème, "dans un triangle rectangle la somme

des carrés des côtés de l'angle droit est égale au carré de l'hypoténuse", rappelle que PYTHAGORE était un adepte fervent des mathématiques. A la **numérologie** est voué un culte quasi magique issu de la manipulation des nombres. Ainsi, le chiffre 1 étant posé comme la matrice primordiale, on constate que la somme des quatre premiers nombres est égale à 10 et que la somme de leurs cubes est égale à 100. Les nombres dits parfaits sont définis comme ceux qui équivalent à la somme de leurs diviseurs. Ainsi, 6 est un nombre parfait car il peut être divisé par chacun des nombres de la somme, 1, 2, 3. Les pythagoriciens inventent la preuve par l'absurde. A l'exigence du raisonnement s'ajoute l'évidence visuelle de la figure géométrique que l'on retrouve plus tard dans les *Eléments de Géométrie* d'EUCLIDE (III^e siècle avant J.C.). On "**géométrise**" les nombres en les représentant par des points alignés en carrés, rectangles, triangles ou figures plus complexes. **Tout devient mesurable**. En mettant en évidence une relation entre la fréquence des sons émis par des cordes vibrantes et la longueur de ces cordes, les pythagoriciens en arrivent à numériser la musique et, par extension, les phénomènes de la Nature : ce sont les nombres, considérés comme éléments des choses, qui créent une harmonie de la Nature proche de la perfection divine. Ainsi se fait jour l'idée que la planète Terre est une sphère à partir du postulat que la sphère est une figure géométrique parfaite. Les pythagoriciens sont aussi crédités de la **notion de terre**, appelé corps dense, comme quatrième élément primordial de la Nature, à côté de l'air, de l'eau et du feu des Milésiens. Les trois éléments, terre, eau, air, des philosophes de l'Antiquité grecque ont en fait leur pendant dans notre conception présente des trois états de la matière, solide, liquide, gaz. Au pythagoricien PHILOLAOS de Crotone (V^e siècle avant J.C.) on doit l'idée d'un cosmos dont le centre serait occupé non par la Terre, mais par un feu central, autour duquel tournent les corps célestes dont la Terre et la Lune, et par extension, l'idée d'un monde sublunaire, corruptible, auquel appartient la Terre et d'un monde au-delà de la Lune, incorruptible. Ce concept réduisait la Terre à une simple planète dans le système solaire.

Les Milésiens avaient tenté d'expliquer la Nature à partir de principes uniques. Les pythagoriciens avaient cru pouvoir reconnaître dans la Nature une structuration fondée sur la mathématique. Les **Eléates**, quant à eux, exigèrent encore plus de rationnel dans la compréhension du Vivant. Reprenant l'idée d'HÉRACLITE que les conclusions tirées de l'observation sont mises en défaut du fait de l'état de perpétuel changement des choses de la Nature, l'école d'Elée élabore une véritable doctrine du **doute** scientifique. XÉNOPHANE (570 - 490), fondateur de l'école d'Elée en Italie du Sud, s'oppose à la théogonie grecque. Il reprend l'essentiel de la doctrine des Milésiens à propos de l'élément primordial, en lui attribuant une signification non plus tangible, comme l'eau ou l'air, mais abstraite en le désignant comme l'**Un**. Le poète philosophe PARMÉNIDE (515 - 450 avant J.C.), un des plus célèbres Eléates, développe dans son *Poème de la Nature* l'idée reprise plus tard par PLATON (428 - 348 avant J.C.), que la perception n'est qu'illusion ; seule la raison est crédible. ZÉNON d'Elée (490 - 420 avant J.C.), disciple de PARMÉNIDE, fonde

l'art de la **dialectique**, dont les ressorts sont le principe de contradiction et le raisonnement par l'absurde. ZÉNON est connu pour le fameux paradoxe d'ACHILLE et de la tortue : la tortue partie avant ACHILLE, bien que très lente, ne sera jamais rattrapée par le vélocé ACHILLE. Le paradoxe est bâti sur le postulat que, si l'on divise le parcours en intervalles égaux, chaque fois qu'ACHILLE a franchi un quelconque intervalle, la tortue l'a quitté dans l'instant précédent.

En opposition avec PARMÉNIDE, EMPÉDOCLE d'Agrigente (490 - 438 avant J.C.) réhabilite le rôle des sens et de l'observation. Il existe non pas un élément primordial mais quatre, l'**eau**, l'**air**, le **feu** et la **terre**, considérés comme le reflet de certains états de la matière et comme les racines des choses de la Nature accessibles à nos sens. Tout en généralisant aux corps solides la notion de terre, aux corps gazeux celle d'air et aux corps liquides celle d'eau, EMPÉDOCLE considérait que **les êtres et les choses sont constitués d'un mélange ou d'une combinaison des quatre éléments** dans des proportions qui conditionnent leur spécificité. Ainsi, le bois contient un peu de l'élément terre, car il est lourd et solide, un peu de l'élément eau qu'il exsude lorsqu'il est chauffé, un peu de l'élément air et de l'élément feu car il dégage de la fumée et des flammes lorsqu'il brûle. La théorie des quatre éléments sera admise et enseignée jusqu'à la Renaissance et même au-delà. Elle fut popularisée par des symboles géométriques, représentés sur des édifices publics. Cette symbolique est encore visible sur des vestiges de monuments (Figure I.2). EMPÉDOCLE avait imaginé qu'à la naissance de l'Univers les quatre éléments étaient mélangés et que de leur attraction sélective étaient nés les plantes et les animaux. Il soutint l'idée que l'animal et le végétal présentaient des analogies au niveau des morphologies et des fonctions de leurs organes et de leurs tissus. Ainsi, les plumes des oiseaux et les écailles des poissons étaient considérés comme des analogues, de même que les feuilles des arbres et les poils des animaux. Malgré ses tendances rationnelles, la philosophie d'EMPÉDOCLE n'en continuait pas moins d'attribuer une part de surnaturel aux lois de la Nature.

ANAXAGORE (500 - 428 avant J.C.) de Clazomènes, disciple d'ANAXIMÈNE, adopte une **théorie pluraliste** qui le conduit à postuler une foule innombrable de corps, mélange de semblables et de contraires, qui auraient été formés dès l'origine des temps et seraient là présents, témoins du chaos des origines et d'un arrangement par une raison ordonnée. Dans ce système la connaissance des choses dépend de l'**évaluation des contraires** : ainsi le froid n'est ressenti que par contraste avec le chaud. ANAXAGORE postule que tout naît de tout, mais avec un certain ordre : l'air naît du feu, l'eau de l'air, la terre de l'eau, la pierre de la terre et le feu de la pierre, et ainsi un nouveau cycle peut être amorcé. A partir de l'observation qu'une outre remplie d'air ne peut pas être comprimée, il tire la conclusion que l'air est un corps. Contemporains d'ANAXAGORE et d'EMPÉDOCLE, PROTAGORAS d'Abdère (490 - 410 avant J.C.) et GEORGIAS de Leontium (487 - 430 avant J.C.) sont des sophistes dont la doctrine annonce celle de SOCRATE, où l'homme s'introspecte. Pour eux, la conception des choses qui nous entourent se bâtit à partir de perceptions sensorielles qui, toutes, ont une valeur et un sens.

2.2.1. L'expérience pour voir.....	156
2.2.2. L'expérience décisive.....	159
2.2.3. La sérendipité ou la découverte inattendue.....	160
2.2.4. Avantages et pièges du raisonnement par analogie.....	162
2.2.5. La part du hasard dans la méthode expérimentale	167
3. L'impact technologique sur les sciences du vivant au XIX ^e siècle	170
3.1. La rationalisation de la physiologie opératoire.....	170
3.2. L'émergence d'une ingénierie instrumentale adaptée à l'expérimentation physiologique.....	175
3.3. L'application de la chimie analytique à l'exploration physiologique	184
4. De nouvelles disciplines dans les sciences du vivant au XIX ^e siècle et leur support méthodologique	187
5. La notion de quantification dans les sciences du vivant	193
6. Une nouvelle donne expérimentale pour les sciences du vivant au XX ^e siècle.....	195
6.1. Un choix raisonné d'organismes modèles.....	196
6.2. Une percée dans les techniques exploratoires des fonctions du vivant	207
6.2.1. L'imagerie de l'infiniment petit	207
6.2.2. Le dénombrement et l'isolement de structures macromoléculaires	217
6.2.3. Le marquage isotopique.....	222
6.2.4. L'instrument et la méthode L'analyse du réel à travers l'instrument.....	224
7. L'ouverture de l'expérimentation biologique au réductionnisme	227
7.1. Les premiers pas vers le réductionnisme expérimental : de l'organe à la cellule.....	228
7.2. La glycolyse acellulaire : prototype de la démarche réductionniste dans l'exploration du métabolisme	230
7.3. Déconstruction et reconstruction de complexes macromoléculaires.....	231
7.4. Naissance de la biologie virtuelle Modélisation de la dynamique cellulaire	234
8. La méthode expérimentale face aux courants de la philosophie et de la vie sociétale contemporaines	238
8.1. La confrontation entre vitalistes et mécanistes L'émergence de l'organicisme.....	238
8.2. Le " <i>Novum Organum</i> " revisité et contesté	243
8.3. Un réexamen du déroulement de la démarche expérimentale	245
9. Conclusion - Le déterminisme et l'essor de la méthode expérimentale De l'organe à la molécule	248

Chapitre IV - Les défis de l'expérimentation sur le vivant	
à l'aube du XXI^e siècle	251
1. L'avènement des biotechnologies	
Vers un nouveau paradigme de la méthode expérimentale.....	252
1.1. Le génome exploré.....	253
1.1.1. De la biologie moléculaire au génie génétique.....	253
1.1.2. L'ADN devenu outil moléculaire.....	259
1.1.3. Les puces à ADN et les puces à protéines	
De la génomique à la protéomique.....	263
1.1.4. De la génomique à la métagénomique.....	268
1.2. Le génome manipulé.....	269
1.2.1. L'ADN utilisé comme matériau de construction.....	270
1.2.2. L'interférence par l'ARN : une nouvelle frontière	
dans la manipulation de l'expression du génome.....	272
1.2.3. La transgression expérimentale du code génétique.....	274
2. Vers la maîtrise des fonctions du vivant pour des buts utilitaires.....	276
2.1. Manipulations de l'ADN végétal	
Le pari des plantes génétiquement modifiées.....	277
2.2. Manipulations de l'ADN humain et espoirs de la thérapie génique.....	280
2.3. Cellules souches et clonage.....	283
2.3.1. L'espoir des cellules souches.....	283
2.3.2. Le spectre du clonage.....	288
2.3.3. Le biais de la parthénogenèse dans le clonage.....	292
2.4. L'"humanisation" de cellules animales à des fins de xénotransplantation.....	292
3. Le cheminement de la médecine face à la méthode expérimentale.....	294
3.1. De la médecine empirique à la médecine expérimentale.....	295
3.2. Les avancées contemporaines de la biotechnologie	
L'exemple de l'imagerie médicale.....	301
3.3. De la médecine expérimentale à la médecine prédictive.....	304
3.4. La pharmacothèque du futur.....	307
4. Vers une conception globalisée des fonctions du vivant.....	309
4.1. Démonstration expérimentale d'interactions protéiques.....	310
4.2. Modélisation mathématique de la complexité du vivant.....	315
4.3. Biorobots et robots hybrides.....	324
5. Conceptualisation et signification des mots dans la démarche expérimentale.....	332
6. Méthode expérimentale, connaissance du vivant et société.....	337
6.1. Le clonage humain censuré par le code de bioéthique.....	339
6.2. La brevetabilité du vivant.....	342
6.3. L'expérimentation animale face à l'abolitionnisme.....	344