

# Revue d'histoire des sciences

TOME 77 - 2024

SOIXANTE-DIX-SEPTIÈME ANNÉE

Revue semestrielle  
publiée avec le concours du CNL  
et soutenue par l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS

FONDATION  
POUR LA  
SCIENCE

  
ARMAND  
COLIN

### *Revue d'histoire des sciences*

CAPHÉS (UAR 3610, CNRS – ENS-PSL)  
45, rue d'Ulm - 75005 Paris - France  
Tél. : +33(0)1 44 32 29 59  
Courriel : [Revue.d.histoire.des.sciences@ens.fr](mailto:Revue.d.histoire.des.sciences@ens.fr)  
Pages web : <https://caphes.ens.fr/rhs/>

### FONDATEUR

Henri Berr (1863-1954), en 1947  
La *Revue d'histoire des sciences*, propriété de la Fondation « Pour la science » – Centre international de synthèse, accueille des travaux concernant l'ensemble des sujets, domaines, méthodes et périodes de l'histoire des sciences.

### DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Dominique Bourel, président par intérim de la Fondation « Pour la science »

### COMITÉ SCIENTIFIQUE

Vincent Barras – Michel Blay – Anastasios Brenner – Hugues Chabot – Olivier Darrigol – Matthias Dörries – François Duchesneau – Jean-Claude Dupont – Robert Fox (président) – André Guillerme – Vincent Jullien – Eberhard Knobloch – Pierre Lamard – Michela Malpangotto – Efthymios Nicolaïdis – Jeanne Peiffer – David Plouviez – Stéphane Schmitt – Jonathan Simon – Brigitte Van Tiggelen

### RÉDACTION

Rédacteur en chef  
Stéphane Tirard  
Secrétaire de rédaction  
Erwan Penchèvre

### COMITÉ DE RÉDACTION

José Ramón Bertomeu Sánchez – Cecilia Bognon – Laurence Bouquiaux – Stéphanie Dupouy – Emmylou Haffner – Aurélien Robert – Pierre Savaton

Périodicité  
revue semestrielle

Impression  
Imprimerie Dupli-print  
95330 Domont

Dépôt légal  
juin 2024, N°

Parution  
juin 2024

ISSN  
0151-4105

© Dunod Éditeur

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. En application de la loi du 1 juillet 1992, il est interdit de reproduire, même partiellement, la présente publication sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

*All rights reserved. No part of this publication may be translated, reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or any other means, electronic, mechanical, photocopying recording or otherwise, without prior permission of the publisher.*

# Revue d'histoire des sciences

Tome 77-1 | janvier-juin 2024

## Sommaire | Contents

- Stéphane TIRARD 5-6  
Éditorial | *Editorial*
- François DUCHESNEAU 7-40  
Organisation protoplasmique et physiologie cellulaire selon Claude Bernard | *Protoplasmic organization and cellular physiology according to Claude Bernard*
- Patrick MATAGNE 41-60  
Le concept de communauté et le projet écologique d'Eugen Warming (1841-1924) | *The concept of community and the ecological project of Eugen Warming (1841-1924)*
- Pierre de JOUVANCOURT 61-100  
La réflexivité géologique des sciences modernes : De l'activité humaine dans la géologie (xix<sup>e</sup> – début xx<sup>e</sup> s.) | *Geological reflexivity in modern sciences: Human geological agency (19th – early 20th c.)*
- Jean-Marc PATURLE 101-131  
Comment la mesure de la Terre par Ératosthène se révèle à la fois remarquablement exacte et terriblement imprécise | *Why Eratosthenes' measurement of the Earth's circumference can be at the same time so accurate and on the other hand so imprecise?*
- Aurélien GAUTREAU 133-169  
La copie de physique d'Évariste Galois au concours de l'École préparatoire en 1829 : Une sonde pour explorer la physique en tant que discipline scolaire | *Évariste Galois's physics copy for the École Préparatoire exams in 1829: A probe to explore physics as a school subject*

## **SOURCES ET RECHERCHE | *SOURCES AND RESEARCH***

Entretien avec Michel MORANGE, L'histoire des sciences et l'approche biographique : Le cas de Louis Pasteur | *An interview with Michel MORANGE, History of science and biography: The case of Louis Pasteur* 171-183

## **ANALYSES D'OUVRAGES | *BOOK REVIEWS***

Liste des analyses d'ouvrages publiées dans ce numéro | *List of book reviews published in this issue* 185

Analyses d'ouvrages | *Book reviews* 186-210

## Éditorial

**Stéphane Tirard,  
Rédacteur en chef**

Ce nouveau tome de la *Revue d'histoire des sciences* offre un ensemble de variés couvrant un large spectre de thématiques et de périodes.

François Duchesneau ouvre ce volume en se penchant sur la doctrine des éléments histologiques que Claude Bernard a placé au cœur des *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (1978). Dans ces réflexions formulées au terme de son œuvre le physiologiste s'interroge en effet sur les limites que l'organisation du protoplasme, le constituant de la cellule, impose à l'investigation expérimentale lorsque l'objet de celle-ci semble régi tant par des lois morphologiques que par d'autres lois sur les processus vitaux.

S'intéressant pour sa part à une autre échelle de la biologie, Patrick Matagne propose une étude de l'écologie du Danois Eugen Warming (1841-1924), et plus particulièrement de son concept de communauté qu'il mobilise à partir des années 1860. Ce concept, qui fut largement utilisé, s'ancre dans la tradition de géographie botanique héritée de Humboldt, et Warming s'inspire également des études du biologiste belge Edouard Van Beneden sur les relations entre organismes à l'œuvre dans la symbiose. Au-delà de son apport conceptuel et de ses amples travaux de terrain, il n'hésite pas, au début du xx<sup>e</sup> siècle, à influencer les choix écologiques de son pays.

Vient ensuite la géologie avec les réflexions de Pierre de Jouvancourt sur la perception aux xix<sup>e</sup> et xx<sup>e</sup> siècles des effets de l'activité humaine sur le globe. Si la notion d'Anthropocène semble avoir émergé récemment et très rapidement gagné le langage commun, l'approche historique offerte ici montre que cela s'inscrit dans une histoire plus longue, riche de questionnements épistémologiques. L'étude de l'action géologique de l'humanité appelle la recherche de ses preuves matérielles, mais elle conduit aussi à des élaborations conceptuelles dont l'invention du Quaternaire ne fut pas la moindre.

Jean-Marc Partule s'intéresse quant à lui à la mesure de la Terre par Ératosthène. L'ambition de cette analyse est de revenir sur l'interprétation de ce travail, en se questionnant notamment sur la longueur du stade utilisée. Il s'agit également d'analyser comment la valeur obtenue, remarquable d'exactitude au regard de ce que nous savons aujourd'hui, résulte pourtant de la combinaison d'approximations qui se sont compensées.

Enfin, Aurélien Gautereau se penche sur la copie de physique d'Évariste Galois au concours de l'École préparatoire en 1829, alors que cette discipline a été récemment rendue obligatoire dans les lycées. Cette étude permet de considérer la physique en tant que discipline scolaire qui se révèle alors engagée dans une transition, portée notamment par Ampère, alors inspecteur général, et Péclet, qui associe au sein de cette nouvelle discipline usage des mathématiques et méthode expérimentale.

La rubrique *Sources et recherche* accueille un entretien avec Michel Morange, auteur en 2023 d'une biographie de Louis Pasteur. Cet échange est l'occasion d'une réflexion sur l'usage du genre biographique en histoire des sciences, autour d'exemples précis issus de cet ouvrage.

# Organisation protoplasmique et physiologie cellulaire selon Claude Bernard

François Duchesneau \*

**Résumé :** Partant de la façon dont Claude Bernard a initialement intégré la théorie cellulaire au programme de la physiologie générale, cet article examine la doctrine des éléments histologiques exposée dans les *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (1878). Il retrace les variantes qui marquent la distinction entre ce qui relève des processus vitaux élémentaires et ce qui est présumé dépendre de lois morphologiques. Bernard semble suggérer que la structure organique du protoplasme cellulaire possède une organisation à ce point complexe que la formation et les transformations ne peuvent en être ramenées à de simples effets des mécanismes « organotrophiques » de la cellule. Cette limitation constitue-t-elle une frontière que la physiologie expérimentale ne saurait franchir ou une difficulté épistémologique que l'évolution des méthodes permettrait éventuellement de surmonter ? Bernard tente en définitive de cerner le type de relation obligée qu'il convient de postuler entre les lois « contemplatives » de la construction des organismes et celles « explicatives » des processus de la vie cellulaire. Bien que ces lois répondent à des critères épistémologiques différents, ne doivent-elles pas cohabiter au sein d'une même théorie ?

**Mots-clés :** cellule; cytode; organisme élémentaire; protoplasme; organisation; irritabilité; développement; noyau; plastidule; morphologie; morphogenèse.

**Summary:** Starting from Claude Bernard's initial integration of the cell theory within his program for general physiology, this article examines the doctrine of histological elements as presented in the *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (1878). It traces back the variants that characterize the distinction between what pertains to the elementary vital processes and what is presumed to depend on morphological laws. Bernard would suggest that the protoplasm's organic structure possesses such a complex organization that its formation and transformations are not reducible to mere effects of the cell's "organotrophic" mechanisms. Does this point to a borderline that experimental physiology cannot cross, or to an

\* François Duchesneau, Département de philosophie, Université de Montréal, C. P. 6128, succursale Centre-ville, Montréal (QC) H3C 3J7, Canada. Courriel : francois.duchesneau@umontreal.ca.

*epistemic shortcoming that evolving methods might eventually overcome? Finally, Bernard tries to assess the type of necessary relation that ought to be allowed between the “contemplative” laws of organism building and the “explicative” ones of cell life. Although these laws meet different epistemic criteria, should they not belong with the same theory?*

**Keywords:** cell; cytode; elementary organism; protoplasm; organization; irritability; development; nucleus; plastidule; morphology; morphogenesis.

Émile Gley, dans son *Traité élémentaire de physiologie*, affirme : « C'est un des plus beaux titres de gloire de Claude Bernard que d'avoir créé cette physiologie cellulaire, base principale de la physiologie générale<sup>1</sup>. » Or l'on peut dater l'avènement de la physiologie cellulaire à un tournant survenu dans le développement de la théorie cellulaire au début de la décennie 1860. Des savants allemands, tels Max Schultze, Ernst Wilhelm von Brücke et Albert Kölliker, modifièrent alors la notion de cellule en déplaçant l'attention des membranes cellulaires vers le protoplasme, constituant principal, et ses propriétés dynamiques d'où découleraient toutes les fonctions vitales. En son temps, Claude Bernard ne se considéra jamais comme un histologiste cellulaire, mais il se comptait au nombre des promoteurs de la physiologie générale. Afin de fournir un fondement théorique à cette physiologie, il a de fait emprunté des concepts aux physiologistes cellulaires allemands et développé une théorie des « éléments » de l'organisme et de leurs propriétés physiologiques. Il en a exposé une première version dans les *Leçons sur les propriétés des tissus vivants* (1866) et dans le *Rapport sur les progrès et la marche de la physiologie générale en France* (1867). Toutefois, dans les *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (1878), Bernard a révisé et ajusté cette théorie afin de tenir compte de développements récents en cytologie et des réflexions critiques qui lui étaient venues entretemps. Je rappellerai brièvement la façon dont Bernard a initialement intégré la théorie cellulaire à sa physiologie générale<sup>2</sup>. Je tenterai surtout de relever les arguments spécifiques relatifs à la physiologie cellulaire dans les développements plus tardifs. On y trouve une concep-

1 - Émile Gley, *Traité élémentaire de physiologie*, 2<sup>e</sup> éd. (Paris : J.-B. Baillière, 1910), 6-7.

2 - Voir à ce sujet François Duchesneau, Claude Bernard : Vers une théorie des radicaux physiologiques de la vie, in L. Loison (dir.), *Claude Bernard : Histoire et philosophie d'une théorie physiologique* (Paris : Vrin, à paraître).



tion plus complexe des éléments histologiques : au-delà de la forme cellulaire, ceux-ci sont analysés en termes de propriétés et d'unités reproductives protoplasmiques. Bernard s'emploie alors à établir une nette distinction entre ce qui relève des processus vitaux élémentaires et ce qui dépend de lois morphologiques. Il s'interroge sur la corrélation possible entre la vie protoplasmique et les mécanismes cellulaires de création et de destruction organique, objets centraux de l'analyse physiologique. La structure organique du protoplasme cellulaire représenterait-elle une organisation à ce point complexe que la formation et les transformations ne pourraient en être ramenées à de simples effets des mécanismes « organotrophiques » de la vie cellulaire ? Cette limitation constituerait-elle une frontière que la physiologie expérimentale ne saurait franchir ou s'agirait-il d'une difficulté épistémologique que l'évolution des méthodes permettrait éventuellement de surmonter ?

## La doctrine initiale des éléments histologiques

Dans les *Leçons sur les propriétés des tissus vivants* (1866) et le *Rapport sur les progrès et la marche de la physiologie générale en France* (1867), Bernard expose sa théorie des éléments histologiques qu'il qualifie de « radicaux physiologiques de la vie ».

« Dans l'exposé qui va suivre nous considérerons spécialement le développement de la physiologie générale, et nous montrerons que tous les progrès de cette science tendent à déterminer les propriétés et les conditions d'existence des éléments organiques qui constituent les radicaux physiologiques de la vie<sup>3</sup>. »

Bernard s'inspire, pour ce faire, des fondateurs de la physiologie cellulaire, entre autres Schultze, Brücke et Kölliker, qui subordonnaient la formation et l'activité des cellules au protoplasme et à ses propriétés dynamiques<sup>4</sup>.

Le type de savoir que Bernard visait à instituer devait s'abstraire des divers traits morphologiques des organismes particuliers et

3 - Claude Bernard, *Rapport sur les progrès et la marche de la physiologie générale en France* (Paris : Imprimerie impériale, 1867), 9.

4 - Ce point est documenté dans Daniel Liu, The cell and protoplasm as container, object, and substance, 1835-1861, *Journal of the history of biology*, 50/4 (2017), 889-925.

se concentrer sur les conditions générales d'organisation et d'activité des éléments organiques, indépendamment des formes qu'ils revêtent<sup>5</sup>. Bernard vise ainsi à concevoir des lois régissant les processus vitaux sous-tendant l'activité fonctionnelle de tout organisme. Il adhère au principe que Matthias Schleiden et Theodor Schwann avaient contribué à établir, suivant lequel toutes les structures des organismes vivants proviennent d'éléments histologiques par diverses transformations. Mais Schwann avait formulé l'hypothèse que les cellules se forment par une sorte de cristallisation à partir d'un fluide organique, le «cytoblastème», dans lequel se structurent les membranes formant le noyau et la cellule même<sup>6</sup>. À compter du milieu de la décennie 1850, Robert Remak et Rudolf Virchow avait substitué à cette hypothèse celle selon laquelle les cellules se forment de cellules existantes par division, ce que Bernard accepte. Il mentionne surtout les objections que Brücke avait soulevées à l'encontre de l'assimilation des cellules à des utricules entourés de membranes.

«En Allemagne, Brücke a soutenu aussi qu'il n'était pas possible d'expliquer tous les éléments du corps par une dérivation de simples cellules; il propose donc de substituer le terme d'*organismes élémentaires* à celui de cellules, comme plus conforme à l'état de la science<sup>7</sup>.»

L'article de Brücke que cite Bernard suggère le rejet du modèle de la cellule formée de membranes enveloppantes selon Schwann. Brücke y substitue la notion d'une unité structuro-fonctionnelle formée de protoplasme et apte à développer des structures protoplasmiques spécialisées, noyaux et autres. Cette unité formant un tout déploierait des dispositions organiques

5 - Claude Bernard, *Leçons sur les propriétés des tissus vivants* (Paris : Germer Baillière, 1866), 11.

6 - Sur le modèle de Schleiden et de Schwann et les correctifs que Remak et Virchow y ont apportées, voir John R. Baker, *The Cell theory : A restatement, history, and critique* (New York : Garland Publishing, 1988 [1948-1955]); François Duchesneau, *Genèse de la théorie cellulaire* (Paris : Vrin, 1987); Henry Harris, *The Birth of the cell* (New Haven : Yale University Press, 1999).

7 - Bernard, *op. cit.* in n. 5, 22. Bernard réfère à Ernst Wilhelm von Brücke, Die Elementarorganismen, *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien : Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, 44/2 (1861), 381-406. Un carnet de notes de Bernard inclut une traduction de cet article : ms. 13a, p. 87-113, voir M. D. Grmek, *Catalogue des manuscrits de Claude Bernard* (Paris : Masson, 1967), 235.

analogues, *mutatis mutandis*, à celles des organismes complexes. En somme, Brücke propose un concept de cellule plus physiologique que morphologique, basé sur les dispositions et les processus propres au protoplasme.

Pour Bernard, comme pour Kölliker<sup>8</sup>, le protoplasme représente le constituant matériel complexe des cellules<sup>9</sup>. Du protoplasme se forment divers organites cellulaires, d'où résultent les traits morphologiques variés des types d'éléments histologiques. Les contenus cellulaires protoplasmiques, de structure plus ou moins complexe, déploient des propriétés spécifiques se traduisant en effets développementaux et fonctionnels. Il s'agit donc d'identifier la propriété générale des éléments, l'irritabilité, qui les caractérise comme vivants. Bernard se concentre sur la façon dont les cellules sont « irritées » par les facteurs du milieu<sup>10</sup>. Il conçoit l'irritabilité protoplasmique comme la propriété la plus générale des éléments histologiques et l'une des conditions d'émergence des propriétés des tissus spécialisés<sup>11</sup>. Un schéma stimulus-réponse représente la relation causale entre les propriétés physiologiques et leurs effets<sup>12</sup>. Dans la mesure où il concevait l'organisme complexe comme une sorte d'« institution sociale organique », Virchow se représentait naguère qu'une combinaison d'irritabilités spécialisées sous-tendait les fonctions de cet organisme. Il divisait donc l'irritabilité en trois catégories : fonctionnelle, nutritive et développementale ou formative. Dotées de ces différentes irritabilités, les éléments histologiques apparaissent plus ou moins spécialisés ou primitifs. Bernard souligne pour sa part que l'irritabilité développementale peut être vue comme déri-

8 - Dans l'édition de 1863 de son *Handbuch der Gewebelehre des Menschen*, Kölliker approuve la réforme physiologique de la théorie cellulaire selon Brücke et il suggère de substituer « cytoplasme » à « protoplasme » de façon à « indiquer immédiatement que, pour [lui], la cellule est aussi l'élément type de l'organisme animal » (Albert Kölliker, *Éléments d'histologie humaine* [Paris : Masson, 1868], 26).

9 - En ce sens, « protoplasme » signifie la base matérielle de la vie organique : voir à ce sujet Andrew Reynolds, *The Third lens : Metaphor and the creation of modern cell biology* (Chicago : University of Chicago Press, 2018), 12-58.

10 - Bernard, *op. cit.* in n. 5, 62-63.

11 - Dans ce cas, il se réfère aux arguments relatifs à l'irritabilité (*Erregbarkeit*) dans Rudolph Virchow, *La Pathologie cellulaire*, 3<sup>e</sup> éd. (Paris : J.-B. Baillière, 1868), 247-277.

12 - Cette connexion apparaîtra ultérieurement comme l'une des contributions de Bernard à la compréhension de la causalité régissant les phénomènes physiologiques cellulaires : voir Oscar Hertwig, *Éléments d'anatomie et de physiologie générale : La cellule* (Paris : Masson, 1903), 86-89.

vée de l'irritabilité nutritive, « n'étant en réalité qu'une de ses manifestations <sup>13</sup> ». C'est un point central de sa théorie des éléments histologiques : quelle que puisse être la fonction attribuée à un élément spécialisé, elle dépend de la capacité de cet élément à assimiler et à éliminer les composés organiques requis pour sa préservation. Cette fonction métabolique primordiale est une condition nécessaire pour que s'instaurent les activités spécialisées des cellules développées.

En formulant ces principes de physiologie cellulaire, Bernard énonce des propositions qui, sujettes à validation, susciteront des ajustements ultérieurs. Il considère ainsi que l'organisation de la matière vivante représente un facteur essentiel conditionnant la manifestation des propriétés physiologiques et l'exercice des processus vitaux : « Les forces inhérentes à cette matière vivante ne peuvent évidemment lui venir de la matière brute ; elles sont un résultat de l'organisation <sup>14</sup>. » Il en résulte que Bernard dénierait au protoplasme la capacité de constituer à lui seul la « base physique de la vie », à l'encontre de ce que Thomas Huxley professera par exemple <sup>15</sup>. On ne saurait non plus l'associer aux biologistes qui, suivant les déclarations de Schultze <sup>16</sup>, considéraient le protoplasme comme une substance amorphe dont les propriétés physico-chimiques suffiraient à rendre compte des processus physiologiques et morphologiques de tous les protozoaires et métazoaires. Au contraire, Bernard semble suggérer que l'occurrence de l'organisation dans les radicaux physiologiques de la vie est due à un système de causes dont nous ne pouvons rendre compte en pratiquant l'analyse expérimentale des éléments de l'organisme. Des lois spécifiques sont présumées régir les processus morphogénétiques et nutritifs dans la cellule, élément histologique, et le concept d'organisation semble désigner une précondition des propriétés dynamiques des éléments générés. Il s'ensuit que les lois de l'embryogenèse et plus généralement de la morphogenèse appartiendraient à la catégorie des « lois contemplatives » : ainsi devrions-nous nous

13 - Bernard, *op. cit.* in n. 5, 85.

14 - Bernard, *op. cit.* in n. 5, 85-86.

15 - Thomas Huxley, On the physical basis of life [1868], in *Collected Essays* (New York : Greenwood Press, 1968), I, 130-165.

16 - Max Schultze, Über Muskelkörperchen und das, was man eine Zelle zu nennen habe, *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin* (1861), 1-27.

contenter de décrire les traits morphologiques des organismes en développement sans accéder aux conditions formelles sous-tendant la création et la transformation de leurs propriétés, et donc à leur explication causale.

Or, considérant le noyau cellulaire, Bernard le tient à la fois pour un organe impliqué dans les processus nutritifs et le maintien de l'élément en sa composition organique et pour la source de laquelle découlent ses transformations.

« En résumé, on pourrait [...] dire que chaque élément histologique possède en lui un centre morphologique et nutritif qui le maintient dans sa forme et dans sa constitution organique. Une fois ce centre détruit ou altéré, la dégénérescence et la mort de l'élément en sont la conséquence<sup>17</sup>. »

Suivant cet état de choses, une distinction épistémologique s'impose entre deux types de lois relatives aux radicaux de la vie. En ce qui a trait à la création de formes, les lois morphologiques sont certes « contemplatives<sup>18</sup> ». La façon dont on les conçoit fait en sorte que les phénomènes de morphogenèse et d'hérédité dépendent de vues spéculatives qui ne rencontrent pas les exigences de l'analyse expérimentale. « Quand on considère l'évolution complète d'un être vivant, on voit clairement que son organisation est la conséquence d'une loi organogénique qui pré-existe d'après une idée préconçue et qui se transmet par tradition organique d'un être à l'autre<sup>19</sup>. » Par contraste, le physiologiste peut tenter de découvrir des « lois organotrophiques », qui valent comme « lois effectives » : elle sont présumées régir les phénomènes de création et de destruction organique, qui découlent des propriétés des dispositifs matériels constitutifs des éléments.

« Quand le physiologiste connaîtra les conditions physico-chimiques sous l'influence desquelles s'accomplit la loi vitale de création de la matière organisée, il aura résolu le problème spécial de la physiologie, parce qu'il pourra prévoir, expliquer et modifier même les phénomènes vitaux, qui ne sont eux-

17 - Bernard, *op. cit.* in n. 3, 101.

18 - Bernard, *op. cit.* in n. 3, 36 : « Mais dans les sciences naturelles, où l'on ne cherche que les lois *contemplatives* des phénomènes, on se borne à étudier les différences organiques pour les confondre dans des unités typiques idéales ».

19 - Bernard, *op. cit.* in n. 3, 125.

mêmes qu'un épanouissement ou un corollaire de cette loi organotrophique<sup>20</sup>.»

À l'époque du *Rapport*, l'établissement de ces lois organotrophiques constituait un objectif à atteindre. L'organisation représentait un objet de recherche à l'intersection même de deux systèmes distincts de lois, morphologiques et organotrophiques. Comment cette ambivalence pouvait-elle se résoudre dans l'explication proprement scientifique des processus dynamiques propres aux radicaux physiologiques de la vie? Cette question restait pendante dans le *Rapport* qui constituait en quelque sorte le prospectus de développements à venir en physiologie générale.

### **Les éléments reconsidérés : mise en valeur de l'activité protoplasmique**

Bien que maints aspects de la physiologie cellulaire bernardienne de 1866-1867 se retrouvent dans les *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux végétaux et aux animaux* (1878), l'accent est désormais mis sur le concept de protoplasme et l'implication de celui-ci dans la théorie des éléments est quelque peu différente<sup>21</sup>. Certes, les principes généraux de la théorie sont maintenus. Par exemple, Bernard souligne la nécessité d'analyser les facteurs physico-chimiques qui conditionnent les phénomènes vitaux; il réaffirme la complémentarité des processus de création et de destruction organique; il professe que les organismes complexes sont formés d'éléments histologiques qui représentent les êtres vivants les plus simples; il insiste sur le rôle régulateur du milieu intérieur dans le fonctionnement des organismes complexes.

En rapport avec les phénomènes de création organique, Bernard se fixe l'objectif de définir ce que représente un élément d'orga-

20 - Bernard, *op. cit.* in n. 3, 138-139.

21 - Mirko D. Grmek, *Le Legs de Claude Bernard* (Paris : Fayard, 1997), 173, suggère une évolution de ce genre : « Certes, dans ses derniers écrits, Bernard se montre partisan de la théorie cellulaire telle qu'elle était enseignée par Virchow, Brücke et Schultze, mais son acquiescement ne fut jamais total. La vie était pour lui un phénomène protoplasmique et non cellulaire au sens strict. Il croyait la vie liée aux compositions chimiques et non forcément aux structures histologiques ».

nisation vitale. Son souci est de rendre compte de la façon dont la composition des organismes à partir des éléments détermine la production d'effets fonctionnels. Ce motif avait suscité l'interrogation sur les radicaux de la vie dans le *Rapport*. Il s'agit toutefois ici de mieux distinguer entre les deux modalités fondamentales de création organique : les synthèses chimique et morphologique. La première, principalement localisée dans les cellules, produit les principes organiques destinés à être détruits par les opérations fonctionnelles des divers éléments histologiques. Quant à la synthèse morphologique, « [elle opère] la réunion [des] principes [organiques immédiats] dans un moule particulier, sous une forme ou une figure déterminée, qui sont le plan ou le dessin de l'individu, des tissus qui le forment, des éléments de ces tissus<sup>22</sup> ». Suivant cette formulation, on peut se représenter que la synthèse chimique n'existe que pour la synthèse morphologique, qu'elle explicite en quelque sorte les éléments organiques sur lesquels cette dernière opère. Cette perspective serait assez conforme à l'approche dont faisait état le *Rapport* de 1867. Cette fois-ci toutefois, l'aperçu que Bernard entend nous donner de la relation entre les deux synthèses semble orienté différemment. Il se propose de nous montrer comment les anatomistes sont progressivement parvenus à « réduire [l'organisme vivant] à ses parties élémentaires<sup>23</sup> », et comment, partant des résultats de cette analyse, les physiologistes et les chimistes peuvent rendre compte de la création organique. Dans ces conditions, on peut légitimement se demander si l'explication physiologique prendra en charge la synthèse morphologique ou se contentera de la présupposer. L'historique de recherche rapporté par Bernard peut-il éclairer cette interrogation ?

Bernard présente une séquence de théories qui se seraient succédé sous les appellations de théorie cellulaire, théorie protoplasmique et théorie plastidulaire. Il rapporte que les successeurs de Schleiden et de Schwann ont contribué à la réduction analytique des éléments histologiques à la forme développementale générique de cellules. Ainsi mentionne-t-il les travaux de Remak et de Schultze au sujet de la dérivation des fibres musculaires striées, mais avec une nette insistance sur ceux de Louis-Antoine

22 - C. Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (Paris : Baillière, 1878), I, 180.

23 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 180.

Ranvier, son ancien collaborateur, élu sur sa recommandation professeur d'histologie générale au Collège de France en 1875. Il reconnaît à Ranvier le mérite d'avoir montré que les fibres nerveuses sont constituées de véritables cellules longitudinales placées bout à bout et se transmettant de façon polarisée les influx sensitifs et moteurs<sup>24</sup>. Aussi conclut-il : « Il est établi maintenant d'une manière générale, grâce aux travaux accumulés des histologistes, que l'organisme est constitué par un assemblage de cellules plus ou moins reconnaissables, modifiées à des degrés divers, associées, assemblées de différentes manières<sup>25</sup>. » Cette thèse sur la généralité morphologique des structures cellulaires sert d'assise à l'embryologie développementale, puisque l'œuf est identifié à une proto-cellule dont seront issues toutes les unités anatomiques de l'embryon et de l'organisme adulte.

Bernard rattache à la théorie cellulaire ainsi comprise une proposition majeure de sa propre théorie physiologique : « La cellule, en un mot, serait le premier représentant de la vie. C'est donc à cet élément, la cellule, que nous devrions maintenant rattacher le phénomène de création, de synthèse organique, aussi bien dans le règne végétal que dans le règne animal<sup>26</sup>. » Sous des apparences factuelles, l'assertion est théoriquement très engagée. Car la cellule est désignée comme un être vivant de plein droit : elle est « l'organisme morphologique le plus simple dont sont constitués les êtres complexes<sup>27</sup> ». Même si la référence n'en est pas fournie à cet endroit, Bernard réfère au concept d'« organisme élémentaire » de Brücke, qu'il avait précédemment annexé. Puis, l'exposé prend en compte l'évolution survenue au sujet du principe de formation des cellules. Schwann avait professé que les cellules se formaient à partir du cytotlastème intra ou extracellulaire et il avait émis l'hypothèse que cette formation pouvait consister en une sédimentation de membranes englobantes, du nucléole au noyau et de celui-ci à la membrane périphérique – processus qu'il supposait analogue à une forme de cristallisation. Bernard y voit la supposition inacceptable d'une production de cellules résultant d'une forme de génération spontanée.

24 - Voir Louis-Antoine Ranvier, *Recherches sur l'histologie et la physiologie des nerfs, Archives de physiologie normale et pathologique*, 4 (1871-1872), 129-149.

25 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, 185.

26 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, 186.

27 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, 184.



Lorsque Bernard présente la théorie protoplasmique comme une autre branche d'alternative théorique, il pourrait renvoyer à deux thèses différentes : soit, à la cellule se substituerait le protoplasme comme forme générique du vivant élémentaire; soit, à la morphologie fonctionnelle de la cellule selon Schwann se substituerait une compréhension distincte de l'organisation cellulaire, désormais basée sur les propriétés structurales et fonctionnelles du protoplasme. De fait, les deux thèses ont eu cours dans les décennies 1860 et 1870<sup>28</sup>. Dans quel sens l'allégeance de Bernard est-elle allée ?

Une prémisse sous-tend l'exposé bernardien consacré à la théorie protoplasmique : Bernard entend établir dans quelle mesure la composition et les propriétés du protoplasme pourraient être des conditions déterminantes de production des phénomènes caractéristiques des vivants. La cellule étant définie comme un organisme élémentaire, formant à ce titre l'analogue d'un « organisme complexe », qu'en est-il des conditions tant matérielles que formelles de sa constitution même ?

Sous le vocable de théorie protoplasmique, Bernard inscrit d'abord les observations des histologistes qui ont récusé la conception de la cellule en tant qu'utricule formé de membranes se sédimentant dans le cytoblastème. Ces histologistes – il mentionne Ferdinand Cohn, Remak et Schultze – niaient l'existence d'une paroi membranaire primordiale comme condition essentielle de composition cellulaire; par contraste, ils posaient le protoplasme comme constituant matériel essentiel de la cellule. Celle-ci est vue comme une masse protoplasmique au sein de laquelle se formerait un noyau. C'est précisément dans ce contexte que Brücke a proposé sa notion d'organisme élémentaire. Cela impliquait que la cellule fût dotée, dans sa composition matérielle, des « instruments » ou organes requis pour la manifestation des phénomènes vitaux. Bernard traduit assez bien la morphologie de l'entité selon cette approche lorsqu'il déclare :

28 - Liu, *op. cit.* in n. 4, 921, souligne qu'alors le concept de protoplasme était susceptible d'interprétations selon différentes « métaphores ontologiques ». Il note en particulier la différence entre une position réductionniste selon laquelle le protoplasme formerait la substance de tout être vivant, et une autre qui s'arrêterait plutôt aux activités du protoplasme comme constituant de la cellule.

« La cellule, formation déjà complexe, a pour point de départ une masse protoplasmique pleine. Ce premier état transitoire donne bientôt naissance à des états plus complexes. Le premier degré de la complication, c'est la formation du *noyau* par condensation de particules protoplasmiques, sorte de nébuleuse qui se délimite de plus en plus nettement. Puis le protoplasma se revêt d'une couche plus dense, début de l'*enveloppe* membraneuse qui sera distincte plus tard. Voilà un second âge, un second degré de complication. La cellule nous apparaît alors comme un petit corps plein, avec noyau et couche corticale<sup>29</sup>. »

À la lumière de cette conception développementale, une masse protoplasmique peut être identifiée comme vivant élémentaire, mais seulement dans la mesure où elle possède une forme d'organisation suffisante pour opérer des fonctions assimilables à celles d'un organisme plus complexe. Ce serait somme toute parce que le protoplasme formerait le contenu cellulaire qu'il pourrait être désigné comme « l'élément dernier où s'incarne la vie<sup>30</sup> », en lieu et place de la cellule : il serait potentiellement cellule.

Or certains développements bernardiens vont apparemment dans le sens de la thèse plus forte selon laquelle le protoplasme « nu » serait l'élément histologique de base, sans considération de son aptitude éventuelle à se structurer sous forme de cellule. Sur ce point, Bernard se réfère à des biologistes intéressés à la taxonomie des vivants élémentaires – Ernst Haeckel, Huxley et Lev Cienkowski. Il y aurait de tels vivants élémentaires dont la caractéristique serait de correspondre de façon permanente à la forme indifférenciée et « transitoire » marquant le début de l'ontogenèse cellulaire. Jusqu'où Bernard s'engage-t-il dans l'adoption de cette thèse forte ? Les faits sont les suivants : il reprend l'identification par Haeckel de ces cytodes ou monères comme des « êtres vivants, isolés, complets<sup>31</sup> ». Il rappelle des distinctions que Haeckel avait introduites dans sa *Generelle*

29 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 188.

30 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 188

31 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 189. Dans l'ouvrage de 1878, Bernard semble se référer principalement à *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles* (1874) de Haeckel, traduction de *Natürliche Schöpfungs-Geschichte* (1868), où se trouvaient résumées les thèses relatives aux protistes. Il semble parfois se référer aux œuvres allemandes de Haeckel, notamment à *Die Perigenesis der Plastidule* (1876), auxquelles il pourrait avoir eu accès par les traductions de M<sup>me</sup> Raffalovich.

*Morphologie der Organismen* (1866) et reprises dans ses *Studien über Moneren und andere Protisten* (1870). Celui-ci proposait de rattacher les cellules à un genre plus général de vivants élémentaires désignés comme des « plastides », dont on trouverait quatre types : cytodes sans membrane, cytodes avec membrane, cellules avec noyau et sans membrane, cellules avec noyau et membrane<sup>32</sup>. Ainsi, en ce qui concerne les cytodes, peut-on se référer à Haeckel pour saisir la distinction que Bernard rapporte entre les « gymnocytodes » sans organisation ni différenciation interne et les « lépocytodes » comportant une certaine différenciation entre couche centrale plus fluide et granuleuse et couche corticale plus homogène et résistante<sup>33</sup>.

Rappelons les principes théoriques associés à la conception des monères chez Haeckel. L'intérêt du biologiste allemand pour ces êtres vivants minimaux était directement lié à sa volonté de retracer les filiations phylogénétiques des divers types d'organismes en remontant aux entités dont ils seraient primordialement issus selon une perspective évolutionniste inspirée de Darwin. « Les premiers organismes, les ancêtres de tous les autres, doivent nécessairement avoir été les monères, c'est-à-dire de simples glomérules albuminoïdes, mous, amorphes, sans structure, absolument dépourvus de parties solides et nettement modelées<sup>34</sup>. » À ces monères Haeckel attribue les « fonctions organiques fondamentales de la nutrition et de la génération<sup>35</sup> ». Il les pose par hypothèse à l'origine de toutes les branches phylogénétiques. Les monères ne se différencient pas les uns des autres en vertu d'une morphologie particulière et, par conséquent, de distinctions fonctionnelles ; elles ne peuvent être ontologiquement distinguées que par des différences présumées de composition chimique. Haeckel rapproche du type originel les êtres vivants actuels dont la constitution interne n'impliquerait aucune différenciation structurale perceptible. Ainsi les monères ne consisteraient que dans des amas de protoplasme

32 - Ernst Haeckel, *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles* (Paris : Librairie Schleicher Frères, 1879), 251.

33 - Il évoque de même les protistes découverts en milieu marin par les trois biologistes, y compris le *Bathybius Haeckelii*, dont l'identité fit l'objet d'une controverse dont Bernard se dégage à la fin des *Leçons* en alléguant de nombreux autres cas d'« être protoplasmiques ». Voir Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 395-396.

34 - Haeckel, *op. cit.* in n. 32, 301.

35 - Haeckel, *op. cit.* in n. 32, 303.

sans noyaux. Haeckel postule qu'elles «se rapprochent plus des inorganismes que des organismes et forment évidemment la transition entre le monde organique et le monde inorganique», et que leur mode de production ressortit à l'«hypothèse de la génération spontanée<sup>36</sup>».

Or Bernard retient des observations réalisées sur ces organismes pré-cellulaires dépourvus de noyaux – thèse morphologique que la protistologie ultérieure s'emploiera à rectifier – qu'il s'agit d'être vivants en raison des propriétés fonctionnelles qu'ils manifestent : contractilité, nutrition, reproduction par division ou gemmation, toutes propriétés qui supposent des dispositifs morphologiques spécifiques et ne sauraient se réduire aux seules conditions physico-chimiques de leur manifestation. Si, selon Bernard, le protoplasme nu peut caractériser des êtres vivants minimaux, ce ne peut être que parce qu'il détient une organisation inhérente dans et par laquelle interviennent des processus physico-chimiques déclenchant les effets physiologiques *sui generis* rattachables à l'irritabilité. Cette organisation est certes assujettie à des lois morphologiques qui fixeront l'ordre de déploiement des processus développementaux de l'élément vivant, mais Bernard, semble-t-il, entend aller aussi loin que possible dans l'identification de l'organisation même des vivants élémentaires en termes de conditions physico-chimiques. Il s'agit de se rapprocher de cet objectif en prenant en compte la constitution physico-chimique du corps, dans une sorte d'état limite, avant sa mise en forme progressive et les différenciations morphologiques subséquentes. Alors, en quelque sorte, l'organisation fonctionnelle se trouverait analytiquement résorbée dans «une composition ou un arrangement physico-chimique déterminé. [...] La notion morphologique disparaît donc ici devant la notion de constitution physico-chimique de la matière vivante<sup>37</sup>.» Par-delà les formes diverses suivant lesquelles la matière vivante peut se mouler, par-delà les caractéristiques morphologiques que manifestent les organismes élémentaires, il serait légitime de supposer que des organisations moléculaires spécifiques, sous l'influence des conditions physico-chimiques ambiantes, suffisent à produire les effets phénoménaux de propriétés vitales élémentaires; tel serait primordialement le cas de l'irritabilité

36 - Haeckel, *op. cit.* in n. 32, 310.

37 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, 192.

et des processus de nutrition et de développement<sup>38</sup>. Dans ces conditions, des entités organiques telles que les monères de Haeckel semblent près de correspondre à cette notion théorique d'une unité de composition organique minimalement apte à déployer des phénomènes vitaux.

Cette position réductionniste semble rejoindre la thèse forte de l'assimilation du vivant élémentaire à une masse protoplasmique qui serait agent de processus vitaux en raison de sa simple composition physico-chimique. Or, alors même qu'il définit l'élément physiologique de base de façon réductionniste en faisant abstraction de toute forme qui y serait associée et en lui trouvant une instanciation-limite chez les cytodes, Bernard accorde aux principes d'organisation morphologique un rôle fondamental dans le déploiement des processus développementaux issus du protoplasme. Ceux-ci se greffent en quelque sorte, non sur une matière brute, mais sur une matière possédant une organisation en vertu de sa « constitution physico-chimique », qui, à défaut de posséder une « forme dominante », posséderait l'équivalent d'une forme actualisable en termes de combinaisons moléculaires. Mais Bernard ne renonce pas pour autant à la subordination des mécanismes du vivant élémentaire à la capacité de transmission héréditaire des formes comme potentiel immanent de développement. D'où l'assertion : « L'élément anatomique que l'on trouve à la base de toute organisation animale ou végétale, la cellule, n'est autre chose que la première forme déterminée de la vie, une sorte de moule où se trouve encaissée la matière vivante, le protoplasma<sup>39</sup>. » Par suite, la cellule est désignée comme un « appareil compliqué », où se trouvent associés noyau, nucléoles, protoplasme ou corps cellulaire et membrane de délimitation externe, appareil sujet à la description des phases de structuration successive de ses

38 - Stéphane Tirard, Claude Bernard et les trois formes de vie, in François Duchesneau, Jean-Jacques Kupiec et Michel Morange (dir.), *Claude Bernard : La méthode de la physiologie* (Paris : Éditions Rue d'Ulm, 2013), 49-62, analyse comment Bernard, soutenant que la vie consiste en une étroite et harmonieuse relation entre les conditions externes et la constitution propre de l'organisme, s'intéressait aux cas-limites dans lesquels cette relation s'exprime. Dans l'état de vie latente, la création et la destruction organique sont suspendues, mais le potentiel de réactivation de ces processus subsiste dans la composition du protoplasme de telle sorte que les propriétés protoplasmiques pourront se manifester sous l'effet de stimulations externes appropriées.

39 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 193.

diverses composantes.

Cet aspect de l'analyse des organismes élémentaires s'affiche très manifestement dans l'exposé de la théorie plastidulaire. Avec cette théorie, on aurait affaire de prime abord à un approfondissement analytique de la théorie protoplasmique, à une recherche qui porterait sur la synthèse formatrice originelle dont les entités vivantes protoplasmiques constitueraient l'aboutissement<sup>40</sup>. Pour cet exposé, Bernard semble exploiter en grande partie les travaux de la cytologie allemande – du moins ceux de Haeckel et d'Eduard Strasburger<sup>41</sup>. Le terme « plastidule » provient de la biologie allemande de l'époque et a été annexé par Haeckel lui-même pour qualifier des micro-composantes du protoplasme des cellules ou « molécules de plasson » (*Plasson-Moleküle*), correspondant aux gemmules hypothétiques selon la doctrine darwinienne de la pangenèse<sup>42</sup>. Haeckel qualifie ces plastidules de molécules unitaires complexes et changeantes, aptes à se diversifier en molécules protoplasmiques ou nucléaires par différenciation au-delà du stade cytodique. Ces molécules seraient dotées de propriétés vitales en prolongement analogique de propriétés inorganiques, telles celles que l'on reconnaît aux formations cristallines. Dans le même temps, en vertu de sa conception moniste des composantes substantielles de la nature, Haeckel attribue aux plastidules une forme de capacité mnémonique qui les rend aptes à reproduire les mouvements organiques des entités dont elles sont issues<sup>43</sup>. Ces plastidules se trouvent transmises d'un protoplasme cellulaire à

40 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 194.

41 - L'une des références de Bernard est sans doute Eduard Strasburger, *Sur la formation et la division des cellules* (Léna : Dabis, 1876).

42 - Ernst Haeckel, *Die Perigenesis der Plastidule oder die Wellenzeugung der Lebens-theilen. Ein Versuch zur mechanischen Erklärung der elementaren Entwicklungs-Vorgänge* (Berlin : Reimer, 1876), 35, attribue à Louis Erlsberg l'invention du terme, référant selon toute probabilité à Louis Erlsberg, Regeneration, or the preservation of organic molecules, *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*, 23 (1875 [1874]), 87-103. Voir aussi Louis Erlsberg, On the plastidule hypothesis, *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*, 25 (1877 [1876]), 177-186.

43 - Voir Robert M. Brain, *The Pulse of modernism : Physiological aesthetics in fin-de-siècle Europe* (Seattle : University of Washington Press, 2015), 46 : « In Haeckel's formulation, every "plastidule" (minute structures within the protoplasm) has a characteristic wave-pattern as a result of its history and environment, which constituted memory for the organism and heredity for the species. "Heredity is the memory of the plastidules," Haeckel wrote, "and variability their power of comprehension" (Haeckel, *Die Perigenesis*, 131). »

celui qui en provient par division et elles engendrent en celui-ci des mouvements de type oscillatoire-vibratoire, correspondant aux processus morphogénétiques et fonctionnels des séries d'entités d'origine. Ces mouvements ataviques plastidulaires apparaissent de ce fait comme la raison suffisante de tout développement organique au sein des cytodes : sous l'effet des plastidules, les cytodes se trouvent dotées d'une organisation moléculaire sous-tendant la production d'organites différenciés, notamment de type nucléaire : tout cela se produirait par extension, variation et complexification progressive des mouvements plastidulaires. Haeckel place ces mécanismes sous-tendant la reproduction de toutes les structures organiques sous des lois générales régissant les mouvements atomiques au sein de combinaisons moléculaires. Celles-ci impliquent une capacité de réplication d'éléments structurels dotés des mêmes capacités dynamiques ondulatoires – sous réserve de variations aptes à les modifier au fil des générations et à entraîner les dérivations ramifiées de l'évolution des types. Ainsi affirme-t-il : « L'évolution de tout plastide individuel n'est que le produit des mouvements actifs de ses plastidules constitutives<sup>44</sup>. » Le mouvement oscillatoire des plastidules serait la cause efficiente des processus biogénétiques – à la fois embryogénétiques et phylogénétiques. À la source de cette propriété se trouve la capacité reproductrice des plastidules sous forme de « mémoire inconsciente » (*unbewusstes Gedächtnis*). Cette force, incarnée dans les constituants du protoplasme chargés de reproduire l'organisation vitale, rendrait compte du développement des corps organiques élémentaires, les « plassons », et, par différenciation ultérieure, fournirait une raison suffisante causale de toutes les formations organiques. « Cette mémoire [plastidulaire] est un facteur dominant du processus biogénétique. C'est par la mémoire de la plastidule que le plasson devient apte, en son mouvement périodique persistant, à transférer héréditairement ses propriétés caractéristiques de génération en génération<sup>45</sup>. »

Haeckel entendait fournir, sous forme de modèle théorique, une représentation moléculaire des éléments du protoplasme assurant la reproduction des organismes, à commencer par celle des

44 - Haeckel, *op. cit.* in n. 42, 65 (notre traduction).

45 - Haeckel, *op. cit.* in n. 42, 67 (notre traduction).

corps organiques les plus simples, composés d'une simple masse protoplasmique. Assumant ce rôle, les plastidules apparaissent comme des molécules complexes aptes à se répliquer au sein de la masse protoplasmique et à orienter, par leurs mouvements oscillatoires, la structuration des autres composés formant le protoplasme des corps organiques élémentaires, tel celui des cellules issues de l'embryogenèse des organismes complexes.

Or, en cette même période, les histologistes vont, en parallèle de cette approche, s'intéresser aux métamorphoses affectant le noyau cellulaire dans la réplication des cellules et la production de la cellule proto-ovulaire. Au terme de ces analyses, les processus de la mitose et de la méiose seront dévoilés<sup>46</sup>. D'entrée de jeu, les histologistes qui se penchent sur la morphogenèse des composantes de la cellule en tant qu'organisme élémentaire vont tendre à écarter toute assimilation de l'organisation structuro-fonctionnelle complexe observée à de simples combinaisons de dispositifs physico-chimiques au sein des protoplasmes. Ils suspendront toute inférence réductionniste au profit d'une démarche d'analyse structuro-fonctionnelle qui aboutira à scénariser les processus organogénétiques au sein des cellules, y compris ceux de la fécondation et de la reproduction.

Confronté à cette dualité d'approches possibles à la théorie plastidulaire, comment Bernard se positionne-t-il? Il rapporte l'essentiel des propositions de Haeckel, y compris les références de celui-ci à la théorie d'Erlsberg et à la thèse d'Ewald Hering relative à la mémoire comme « propriété élémentaire des particules organiques<sup>47</sup> ». Mais il en infère surtout la reconnaissance d'un fait général relatif à la « complexité de structure du protoplasma<sup>48</sup> », et il souligne que les hypothèses du type de celle de Haeckel restent en attente de confirmation. Sous l'angle positif, Bernard relève des constats qui semblent ressortir de travaux histologiques, en particulier ceux de micrographes, tels Otto Bütschli, Strasburger, Carl Heitzmann et Carl Frommann, qu'il connaît sans doute à travers la traduction de l'ouvrage de Strasburger, *Zellbildung und Zelltheilung*, parue sous le titre *Sur*

46 - Pour l'analyse historique de ces découvertes, voir William Coleman, Cell, nucleus and inheritance : An historical study, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 109 (1965), 125-158.

47 - Haeckel, *op. cit.* in n. 42, 40-41.

48 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 196.



*la formation et la division des cellules* (1876). Il note la « constitution très complexe du noyau<sup>49</sup> », au vu des phases qui en caractérisent la division et la reconstitution comme organe de développement et de fonctionnement cellulaire. Cette complexité à la fois structurale et fonctionnelle et les processus qui la traduisent dans le devenir de la cellule apparaissent similaires chez les végétaux et les animaux – ce qui conforte une thèse bernardienne : la similarité des lois de l'organisation dans les deux règnes. Aussi, selon Bernard, la division des phénomènes physiologiques en phénomènes de création et de destruction organique est sous-tendue par la distinction anatomique entre le protoplasme, siège des processus fonctionnels de destruction, et le noyau responsable de la synthèse organique : « Le noyau est un appareil de synthèse organique, l'instrument de la production, le germe de la cellule<sup>50</sup>. » Bernard présente cette proposition théorique – plus forte que la simple conception du noyau en tant que centre nutritif de la cellule<sup>51</sup> – comme découlant de faits établis par les histologistes. Il mentionne notamment à cet effet des observations de Ranvier sur les globules lymphatiques de l'axolotl et de Richard Hertwig sur les cellules de la *Podophrya gemmipara*, dévoilant des phénomènes de bourgeonnement de noyaux, prélude à des restructurations du protoplasme dans les cellules-filles. Il relève par ailleurs la décomposition morphologique des noyaux selon Leopold Auerbach qui y identifie des éléments structuraux distincts : enveloppe, suc nucléaire, nucléoles et granulations diverses.

Ces distinctions anatomiques lui permettent d'évoquer deux hypothèses alors en vigueur sur le rôle du nucléole dans la reproduction nucléaire, selon que le nucléole est considéré comme une structure pleine qui subit des transformations par phases aboutissant au dédoublement du noyau – thèse exposée par Auerbach, Strasburger et Wilhelm Hoffmeister – ou selon qu'il est tenu pour comporter des micro-vésicules servant d'organes d'assimilation organique et de synthèse morphologique – hypothèse privilégiée notamment par Édouard-Gérard Balbiani. Bernard semble pencher pour cette seconde conception : il relève en effet qu'elle suppose des dispositifs correspondant à des

49 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 197.

50 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 198.

51 - Voir Bernard, *op. cit.* in n. 3, 100.

mouvements observés de reptation et de contraction vive qui ressemblent à ceux des amibes sur lesquelles Balbiani avait particulièrement travaillé. Rétrospectivement, la première option semble plus conforme aux observations de phases de la mitose et de la méiose que validera la physiologie cellulaire ultérieure. Le penchant de Bernard en faveur de l'autre option tient sans doute à l'identification de l'irritabilité comme propriété physiologique de base de tous les éléments histologiques. Il se représente la division cellulaire comme un processus de nutrition et de développement régi par les structures nucléaires : celles-ci y opèrent les synthèses morphologiques requises pour que les divers éléments histologiques déploient leurs opérations fonctionnelles. L'irritabilité est la propriété physiologique fondamentale des structures protoplasmiques dans l'organisme élémentaire que constitue la cellule. Le noyau, structure protoplasmique complexe, est l'agent qui actualise cette disposition dynamique dans l'organisation de l'unité morphologique vivante. Du moins, tel est le type d'interprétation que semblent suggérer à Bernard les hypothèses théoriques en cours d'élaboration au sujet du noyau cellulaire et des processus qui s'y rattachent.

Selon Bernard, le volet analytique de la physiologie cellulaire peut utilement se déployer dans l'étude des phénomènes fonctionnels dont le protoplasme est le siège, en vue d'en révéler les mécanismes. Mais la morphogenèse cellulaire recèlerait des difficultés particulières lorsqu'on aborde la reproduction des unités protoplasmiques, agents et vecteurs de création organique : « Tous les problèmes d'origine organique, toutes les questions qui s'y rattachent, ne sont point résolus<sup>52</sup>. » Dans ces conditions, si Bernard privilégie de rattacher les phénomènes de création organique à la composition complexe du protoplasme et aux mécanismes physico-chimiques qui en découlent, il lui semble approprié de supposer qu'une forme spécifique d'organisation est présente dans le protoplasme et constitue la raison suffisante des processus générateurs et nutritifs qui s'y produisent par-delà les mécanismes impliqués. Dans les *Leçons* de 1878, il avance une conception moléculaire des éléments histologiques, mais il semble en vérité avoir plutôt tendu à conférer aux structures moléculaires un rôle instrumental dans le maintien et le déve-

52 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 201.

loppement des mécanismes fonctionnels chez l'organisme élémentaire. Ces mécanismes sont essentiellement impliqués dans la production de séquences d'effets métaboliques, mais ne sauraient rendre compte en termes physiques et chimiques des processus organisationnels mêmes<sup>53</sup>.

### **L'irritabilité, propriété vitale fondamentale des éléments**

Bernard tient l'analyse des propriétés du protoplasme cellulaire pour le fondement de toute explication physiologique. Tous les processus vitaux se rattachent à des modalités de ces propriétés, diversement affectées par les conditions d'organisation découlant de la reproduction et de la différenciation des cellules. Ainsi les éléments histologiques réalisent-ils en diverses configurations morphologiques les opérations physico-chimiques dont résultent les séquences de phénomènes correspondant aux fonctions. Le protoplasme est désigné comme l'«agent des phénomènes de création organique<sup>54</sup>» par suite des synthèses chimiques qu'il produit. Mais cette action n'est possible que dans la mesure où le protoplasme détient une propriété d'irritabilité qui déclenche une motilité spécifique sous l'effet de facteurs physico-chimiques du milieu ambiant. Surtout, l'irritabilité est présentée comme la «seule propriété vitale élémentaire, dont l'existence est commune aux deux règnes<sup>55</sup>» : elle est «la propriété que possède tout élément anatomique (c'est-à-dire le protoplasma qui entre dans sa constitution) d'être mis en activité et de réagir d'une certaine manière sous l'influence des excitants extérieurs<sup>56</sup>». L'irritabilité se traduit dans les éléments anatomiques des organismes complexes par des processus spécifiques de création et de fonctionnement organique : des propriétés telles que la capacité nutritive et la sensibilité peuvent donc être tenues pour des formes modales d'irritabilité, se manifestant dans les éléments spécialisés des organismes.

53 - Ce point est développé par Claude Debru, Claude Bernard et l'idée d'une chimie biologique, *Revue d'histoire des sciences*, 32/2 (1979), 143-162.

54 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 241.

55 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 243.

56 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 242.

Comme il l'avait fait dans le *Rapport*, Bernard reconnaît la contribution de Virchow rattachant l'activité fonctionnelle de la cellule à l'irritabilité<sup>57</sup>. Il cite Virchow selon lequel l'irritabilité est « la propriété des corps vivants qui les rend susceptibles de passer à l'état d'activité sous l'influence des irritants, c'est-à-dire des agents extérieurs<sup>58</sup> ». Même s'il accepte la définition virchowienne, Bernard rejette la supposition selon laquelle des propriétés distinctes opéreraient comme agents causaux de processus hétérogènes. Les phénomènes dont on vise à rendre compte ne correspondent pas à des types différents de processus, requérant des lois distinctes pour régir leur production. L'unique propriété dont il est question dépend de la constitution matérielle du protoplasme et se traduit en interactions physiques et chimiques avec le milieu organique par le biais de stimulations et de réactions corrélatives. L'organisation du cytoplasme agit dans de tels cas comme un catalyseur. Tout tissu est considéré vivant s'il possède la « faculté commune de réagir sous l'influence des excitants extérieurs<sup>59</sup> ». Si l'irritabilité est désormais attribuée génériquement au protoplasme, la composition particulière de celui-ci sous-tend les diverses propriétés développementales et fonctionnelles qui s'y manifestent. Par conséquent, « l'autonomie des tissus n'est au fond qu'une différenciation protoplasmique<sup>60</sup> ». Ce principe guide l'étude expérimentale des stimulants et des anesthésiques que l'on applique aux divers types d'éléments histologiques par l'intermédiaire du milieu organique intérieur. Les propositions théoriques que le physiologiste considère pouvoir inférer des données expérimentales ainsi obtenues se détaillent comme suit : 1) la propriété d'irritabilité constitue le fondement des

57 - Rudolph Virchow, *Reizung und Reizbarkeit*, *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie*, 14 (1858), 1-63, avait traité de l'irritabilité en prolongement de sa *Cellulopathologie*. Charles Robin, *Principes d'histologie*, *Revue des cours scientifiques de France et de l'étranger*, 409-415, avait critiqué la conception virchowienne qu'il qualifiait de « vitaliste » et comparait à celle de Broussais. Virchow avait répliqué dans Rudolf Virchow, *Sur l'irritabilité. Plaidoyer pro domo sua*, *Gazette hebdomadaire de médecine et de chirurgie*, 34 (1868), 534-536; 35, 545-548; 36, 561-562. Laurent Loison, *Pourquoi refuser la théorie cellulaire ? Le projet d'une anatomie chimique chez Charles Robin (1821-1885)*, *Revue d'histoire des sciences*, 68/1, (2015), 23-45, rend compte de cette controverse et en montre l'incidence sur l'évaluation critique de la théorie cellulaire par Robin.

58 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 248.

59 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 249-250.

60 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 250.

propriétés spécifiques manifestées par les éléments des divers tissus spécialisés; 2) la condition d'exercice de cette propriété générique est une disposition spécifique du protoplasme de ces éléments anatomiques; 3) cette propriété opère sous l'action de déterminants physico-chimiques des milieux ambiants; 4) toutes les fonctions accomplies par les éléments anatomiques spécialisés reposent ultimement sur la propriété protoplasmique d'irritabilité.

À ce stade, une nouvelle perspective d'analyse se dessine : si l'irritabilité est désignée comme la propriété protoplasmique dont dépendent primordialement les phénomènes d'organisation vitale et si Bernard endosse jusqu'à un certain point une version protoplasmique et plastidulaire de la théorie cellulaire, les processus déclenchés par l'irritabilité peuvent-ils, sur la base des mécanismes situés dans le protoplasme et ses organites constitutifs, rendre compte causalement de l'organisation même ?

### **La raison suffisante problématique de l'organisation**

L'organisation est la résultante d'une synthèse morphologique, créatrice de formes qui s'imposent à la matière vivante amorphe. Par ailleurs, cette matière vivante est le siège des processus contrastés de création et de destruction organique. Dans la perspective bernardienne, ceux-ci vont constamment de pair, l'un suscitant l'autre, et les deux sont passibles d'analyses en termes de processus physico-chimiques *sui generis*. Mais il n'en est pas de même pour la synthèse morphologique : même si celle-ci s'exerce simultanément à la synthèse organique et se confond avec elle dans les effets phénoménaux survenant dans le protoplasme des unités histologiques impliquées, elle n'en obéit pas moins à des lois spécifiques dictant la séquence de transformations dont l'organisation est le terme<sup>61</sup>. Bernard parle de la « séparation théorique » entre la création ou synthèse chimique et la création ou synthèse morphologique et il souligne l'indépendance absolue des lois morphologiques par rapport

61 - Grmek, *op. cit.* in n. 21, 112, cite une note du cours donné au Muséum en juillet 1877 : « La morphologie est ce que nous appelons la synthèse organisée. La synthèse organisée suppose la synthèse organique mais ne l'explique pas ».

à celles qui «règlent les manifestations vitales essentielles du protoplasma<sup>62</sup>». Ces lois sont identifiées comme «descriptives», spécifiant l'enchaînement des formes, et non comme «explicatives», faute de révéler les conditions nécessaires de production de ces formes. Traitant d'embryogenèse, Bernard reprend manifestement à son compte les schèmes théoriques de l'*Entwicklungsgeschichte* suivant les modèles légués notamment par Carl Ernst von Baer, Johannes Peter Müller et Remak<sup>63</sup>. Pour une part, cette pratique théorique s'applique aussi à la dérivation morphologique des cellules spécialisées. C'est seulement en ce qui a trait aux propriétés du protoplasme que les déterminismes physiologiques deviennent objets d'analyse causale. Or, si Bernard souligne ainsi la séparation des concepts théoriques en jeu quant à leurs fondements respectifs, il ne peut se dispenser de les associer lorsqu'il s'agit de rendre compte de l'économie des processus vitaux dans les organismes constitués, tant élémentaires que complexes.

La présentation qui est faite de la morphologie cellulaire illustre bien ce trait épistémologique. Après avoir rappelé que la matière protoplasmique peut caractériser des êtres vivants préalablement à toute forme d'organisation, préalablement donc aux «mécanismes vitaux» dûment constitués<sup>64</sup>, Bernard réfère au règne des monères catégorisées par Haeckel comme aptes à représenter cet état de vivants sans formes, et relevant donc en principe de la seule analyse physiologique. À ce point de vue, les propriétés vitales manifestées par le protoplasme pourraient être détachées de toute morphologie protoplasmique. Or Bernard a relevé la présence de microstructures plastidulaires, en principe responsables de la reproduction des entités protoplasmiques et de la diversification des organites qui s'y développent. De ce point de vue donc, les propriétés vitales manifestées par les protoplasmes ne sauraient se concevoir comme totalement abstraites d'une certaine morphologie protoplasmique. Bernard considère de fait les êtres vivants élémentaires, dénués de toute structure fonctionnelle, telles les cytodes haeckeliennes, comme

62 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 296.

63 - Sur la morphologie du développement, voir Timothy Lenoir, *The Strategy of life. Teleology and mechanics in nineteenth century German biology* (Dordrecht : Reidel, 1982), 72-95.

64 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 297.

une sorte de réquisit théorique servant à mettre en valeur le fait que l'accomplissement par les unités vitales de leurs processus fonctionnels dépend de leur forme organique. Bernard déclare d'une part :

La matière protoplasmique [...] peut au début constituer des êtres en quelque sorte sans forme fixe, ou au moins sans mécanismes vitaux, morphologiquement déterminés. Ce sont les êtres les plus simples, ne possédant que la vie nue, sans les formes variées et diversifiées à l'infini sous lesquelles elle nous apparaît plus tard<sup>65</sup>.

Il note d'autre part :

Nous ne discuterons pas la question de savoir si ces êtres monériens ont une véritable morphologie, et si la *cytode* d'Haeckel peut être à la fois, par une sorte d'arrêt de développement, soit un animal vivant isolé complet, soit le commencement possible d'autres organismes beaucoup plus complexes. Ces questions sont fort incertaines et fort problématiques<sup>66</sup>.

Les processus dont le protoplasme serait le siège indépendamment des formes organiques peuvent en principe s'analyser en déterminismes spécifiques : ils s'accomplissent conformément aux lois de la physique et de la chimie, mais ils se produisent dans des conditions particulières d'organisation suscitant diversément l'irritabilité. L'apparition et l'évolution des formes d'organisation relèvent d'un ordre de raisons qu'il convient de dissocier des raisons applicables à l'explication des processus fonctionnels mêmes. De ce point de vue, l'histologie cellulaire constitue le point de départ de toute étude sur les formes d'organisation vitale : « La constitution du protoplasma en un *élément anatomique* doué d'une morphologie évolutive certaine et à longue portée est représentée par la cellule, qui est le premier degré de la synthèse morphologique, commun à tous les êtres vivants<sup>67</sup>. » Sur cette base, Bernard distingue la morphologie générale de la morphologie spéciale. La première concerne les caractéristiques de l'organisme élémentaire que représente la cellule, du point de vue de ses mécanismes de formation et de reproduction; cette

65 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 297.

66 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 299.

67 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 300.

morphologie représenterait en quelque sorte un corpus théorique parallèle à la physiologie générale<sup>68</sup>. La morphologie spéciale s'intéresse pour sa part aux modes de regroupement des cellules en structures spécialisées dans l'organisme complexe : s'y rattache primordialement l'embryogenèse.

La morphologie générale selon Bernard se concentre sur les modalités suivant lesquelles le protoplasme se restructure en fonction des caractéristiques organisationnelles de la cellule-mère. Il entend mettre en lumière la continuité d'un processus de structuration se répliquant d'une génération à l'autre d'entités organiques élémentaires – avec d'éventuelles variations liées aux milieux externe et interne dans lesquels ce processus se réalise. Ce qui se transmet dans ces conditions, c'est le projet d'organisation structurale et fonctionnelle que vont réaliser de façon différenciée les diverses cellules, celles des organismes unicellulaires comme des organismes complexes. Si Bernard évoque volontiers le principe *Omnis cellula e cellula*, qu'il qualifie d'« axiome », il récuse toute hypothèse de formation de cellules depuis des blastèmes liquides dépourvus de structures organiques propres, et il insiste, à l'instar de Julius Sachs<sup>69</sup>, sur le fait que toute néoformation cellulaire découle de « l'arrangement nouveau d'un protoplasma préexistant<sup>70</sup> ». Suivant la typologie proposée par Sachs, il distingue quatre modes de reproduction : la multiplication, le rajeunissement, la conjugaison et la gemmation ; il note cependant que le processus de division semble avoir été légitimement tenu par Remak et Kölliker pour « le mode exclusif de la genèse cellulaire<sup>71</sup> », quelles que fussent les modalités apparentes d'émergence des nouvelles cellules dans le protoplasme préexistant. Une séquence de phases ca-

68 - Une note du cours de juillet 1877, citée par Grmek, *op. cit.* in n. 21, 173, apparaît significative : « *Conception de l'organisme*. Il est fait en vue de la vie cellulaire, vie qui comprend les deux forces créatrice et destructrice de l'organisme. [...] Nous avons étudié les phénomènes de création vitale (la vie, l'organisation) et de destruction vitale (la mort, la désorganisation). Ces deux problèmes incombent à la chimie (Lavoisier) et nous les avons étudiés à ce point de vue. Mais il n'y a pas seulement formation et destruction de protoplasma. Il y a des êtres ayant une *organisation avec des formes* donnant lieu à des phénomènes vitaux très différents les uns des autres et qui ne sont que l'expression de la *morphologie* de l'être. »

69 - Voir Julius Sachs, *Physiologie végétale : Recherches sur les conditions d'existence des plantes et sur le jeu de leurs organes* (Paris : Masson, 1868).

70 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 301.

71 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 302.



ractrise la réplcation des unités organiques vivantes suivant le type d'organisme à réaliser : ces phases mettent en scène la division des noyaux qui accompagne et régit la formation de nouvelles cellules. Bien qu'il incline à s'aligner sur la conception organotrophique des processus nucléaires selon Balbiani<sup>72</sup>, il emprunte des figures de Strasburger et de Bütschli, qui représentent des phases de la mitose et pointent vers la découverte de celle-ci<sup>73</sup>. De fait, Bernard n'est pas en mesure de déterminer le rôle des composantes du noyau dans les phases successives du processus. Il suppose, dans le protoplasme, l'apparition de dispositifs par lesquels opéreraient des « forces attractives et répulsives, s'exerçant surtout sur le noyau et manifestées par la polarité et la disposition rayonnante qu'elles impriment aux particules du protoplasma<sup>74</sup> ». Cette hypothèse semble suggérer que, lorsque le noyau commence à subir des modifications structurelles, des processus physico-chimiques se produisent dans le protoplasme et servent d'instruments en vue de faire émerger une forme d'organisation cellulaire. Ainsi s'esquisserait une ligne d'analyse déterministe qui se déploierait en parallèle des découvertes morphologiques relatives à la reproduction des cellules et à leur intégration comme constituants d'organismes complexes. Quelle sorte de compatibilité Bernard pouvait-il en définitive concevoir entre les lois morphologiques qu'il quali-

72 - Voir Claude Bernard, Cours de physiologie générale au Muséum d'histoire naturelle : Phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux, *Revue scientifique*, 2<sup>e</sup> série (1874), 289-295, ici 290 : « Les études des histologistes ont depuis longtemps établi que, parmi les parties constitutives de l'élément organisé (la cellule), il y en a un primordial, le *noyau*, qui possède un rôle très important. Il est le centre des actions morphologiques et nutritives qui s'accomplissent dans cet élément ; il maintient la cellule dans sa forme et dans sa constitution ; il se segmente, se divise préalablement lorsque l'élément venant à proliférer se multiplie par gemmation ou par scission. Or, il arrive que dans certains êtres cellulaires simples, comme des infusoires, ce noyau devient tour à tour centre nutritif ou centre générateur, selon les phases d'évolution de ces êtres. Il en résulte ainsi entre le noyau cellulaire et les organes reproducteurs d'un être complet une nouvelle analogie qu'ont bien mise en évidence les beaux travaux de M. Balbiani sur la génération des infusoires. À ne considérer que l'organite élémentaire, la puissance génératrice y paraît donc confondue avec la puissance nutritive et évolutive dans le même foyer. On voit ainsi, selon la conception de Brücke, la cellule se comporter comme un être complet, comme un individu botanique ou zoologique avec tous ses attributs. »

73 - Les figures 31-35, empruntées à Strasburger, illustrent la division du noyau dans les blastomères de *Pinus sylvestris* ; la figure 36, empruntée à Bütschli, illustre l'équivalent dans les érythrocytes de l'embryon de poulet.

74 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 306.

fiait de « dormantes et expectantes<sup>75</sup> » et les processus causaux inhérents au protoplasme que le physiologiste entreprend d'expliquer ?

Confronté à ce problème, Bernard souligne la « relation étroite et harmonique » entre les conditions du milieu dans lequel opère l'organisme, et les dispositifs, les mécanismes, qui le constituent<sup>76</sup>. Certes, la raison suffisante causale de cette constitution organique est présumée sous forme de lois morphologiques : ces lois décrivent de telles organisations comme la résultante téléologique de conditions développementales héréditaires qui nous sont inconnues. Dans le même temps, l'organisation ne relève de l'explication causale qu'au seul point de vue des dispositifs fonctionnellement intégrés que possèdent actuellement les êtres vivants et leurs composantes, quel qu'ait été le devenir antérieur de ces formes<sup>77</sup>. Les propriétés morphologiques figurent alors au nombre des facteurs déterminants des phénomènes physiologiques en corrélation avec les facteurs physico-chimiques qui caractérisent les effets des milieux sur l'individualité organique. Elles y figurent comme facteurs aptes à expliquer « l'ordonnance, le consensus et l'enchaînement de ces phénomènes<sup>78</sup> ». Par métonymie, Bernard en vient parfois à identifier les conditions organiques des phénomènes vitaux aux lois morphologiques dont elles sont issues, par exemple dans la déclaration suivante :

« [Les manifestations de la vie] résultent d'une relation étroite et harmonique entre les *conditions* et la *constitution de l'organisme*. Tels sont les deux facteurs qui se trouvent en présence et pour ainsi dire en collaboration dans chaque acte vital. Ces deux facteurs sont en d'autres termes : 1° les *conditions physico-chimiques* déterminées, extérieures, qui gouvernent l'apparition des phénomènes ; 2° les *conditions organiques*, ou *lois préétablies* qui règlent la succession, le concert, l'harmonie de ces phéno-

75 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 335.

76 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 345.

77 - Selon Gustavo Caponi, Claude Bernard and his concept of physiological function, *Principios : Revista de filosofía*, vol. 26, n° 50, 65-85, l'attribution de fonction dans la physiologie bernardienne ne repose pas sur des *raisons d'être* causales d'entités organiques accomplissant des fonctions données. L'assertion fonctionnelle réfère à l'aptitude de l'entité à accomplir un ou des processus contribuant à la préservation de l'organisme conçu comme un microcosme.

78 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 344.

mènes. Ces conditions organiques ou morphologiques dérivent par atavisme des êtres antérieurs, et forment l'héritage qu'ils ont transmis au monde vivant actuel<sup>79</sup>. »

Toutefois, au point de vue méthodologique, Bernard suggère de détacher le plus possible les effets phénoménaux émanant des éléments organisés vivants de leurs causes morphogénétiques présumées et de saisir la corrélation de ces effets avec les facteurs physico-chimiques qui les infléchissent ou les modifient de façon à générer les processus physiologiques. Sur quelles justifications théoriques s'appuie alors cette pratique méthodologique ?

Les processus conjoints de destruction et de création organique que déploie tout vivant, élémentaire ou complexe, constituent le thème théorique le plus fondamental de la physiologie générale. Bernard rattache ces processus au protoplasme, comme à l'élément matériel de base de toute manifestation vitale, en deçà, pourrait-on dire, de toute constitution morphologique dûment établie. « C'est cette vie [du protoplasme] sans formes caractéristiques proprement dites, dont les mécanismes, les propriétés et les conditions sont communs à tous les êtres ; c'est elle qui constitue le véritable domaine de la physiologie générale<sup>80</sup>. » Or, en toute composante de l'organisme, même si l'individualité vivante se trouve réduite à un simple amas de protoplasme, la création se décline non seulement en synthèse chimique, formant les principes immédiats de la matière vivante, mais aussi en synthèse morphologique, celle-ci assemblant ces principes « dans un moule particulier, sous une forme ou une figure déterminée, qui sont la figure ou le dessin spécifique des différents êtres, animaux et végétaux<sup>81</sup> ». Certes, cette mise en forme peut être tenue pour accessoire par rapport à la production constante des principes chimiques synthétisés comme bases des propriétés protoplasmiques des vivants élémentaires. Ce n'est cependant que dans la mesure où les structures élémentaires résultant de la morphogenèse sont sujettes à interagir avec les facteurs physico-chimiques du milieu que l'analyse physiologique peut s'en emparer et dévoiler les déterminismes affectant les processus vitaux dans leur ordre.

79 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 345.

80 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 351.

81 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 350.

De façon intéressante, Bernard, après avoir insisté sur le caractère amorphe du protoplasme, rectifie cette description en le qualifiant de « monomorphe <sup>82</sup> ». Car, pour constituer un être vivant, il semble qu'une « forme » doive s'y trouver, qui représente le potentiel d'opérer des synthèses morphologiques en sus des synthèses chimiques, y compris celle de reproduire l'individualité organique en tant que telle. C'est pourquoi Bernard affirme que « la forme traduit une influence héréditaire ou atavique, dont l'existence, déjà appréciable pour le protoplasma, deviendra tout à fait éclatante dans les organismes supérieurs <sup>83</sup> ». La forme constitue, au sein des vivants élémentaires, une instance distincte de la composition même du protoplasme et c'est la raison pour laquelle le statut d'organisme élémentaire est attribué à la cellule, protoplasme figuré et comportant une morphologie nettement dessinée. Si la « substance » et la « forme » de ces êtres vivants peuvent être tenues pour indépendantes l'une de l'autre du point de vue des raisons suffisantes causales dont elles relèvent et des fonctions synthétiques distinctes mises en œuvre, elles se trouvent liées par une « relation nécessaire <sup>84</sup> ». Cette relation implique la subordination fonctionnelle des propriétés morphologiques à la production et au maintien des mécanismes vitaux de l'élément, car les séquences de formes diverses suivant lesquelles se réalisent les organismes sont assujetties à la condition de permettre l'exercice des processus de destruction et de création organique au sein du protoplasme. Bernard pose donc, en relation avec l'état cellulaire et avec tout état de composition réalisé à partir de l'état cellulaire, une loi fondamentale de l'organisation vitale, qu'il désigne comme la « loi de la construction des organismes ». Celle-ci stipule que « l'organisme est construit en vue de la vie élémentaire <sup>85</sup> ». Tout organisme, si complexe soit-il et quelle que soit sa morphologie, remplit, par son organisation même, les conditions requises en vue d'assurer la vie des éléments histologiques dont il est constitué.

« Ainsi la loi de *la construction des organismes et du perfectionnement organique* se confond avec les lois de *la vie cellulaire*. C'est

82 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 352.

83 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 354.

84 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 353.

85 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 354.

pour permettre et régler plus rigoureusement la vie cellulaire que les organes s'ajoutent aux organes et les appareils aux systèmes. La tâche qui leur est imposée est de réunir qualitativement et quantitativement les conditions de la vie cellulaire<sup>86</sup>. »

Les cellules, dans l'organisme complexe, représentent donc les sujets et agents de tous les processus physiologiques : Bernard les présente comme «les matériaux premiers de tout organisme»; il souligne que «toute modification de l'organisme se résume toujours dans une action portée sur une cellule<sup>87</sup>»; il ajoute, comme une loi qu'il a été le premier à formuler : «Tous les phénomènes physiologiques, pathologiques ou toxiques ne sont au fond que des actions cellulaires générales ou spéciales<sup>88</sup>. » À ce point de vue, la physiologie cellulaire est sans doute appelée à servir de fondement à la physiologie générale. Bien qu'il ne soit pas ultimement possible d'expliquer les processus morphogénétiques régissant la formation et la reproduction cellulaire en termes de mécanismes protoplasmiques, l'exploration des déterminismes physiologiques inhérents aux cellules permet le dévoilement de lois de l'organisation vitale.

Les organismes peuvent s'analyser en composés d'éléments cellulaires qui forment autant d'unités vivantes complexes. Ces «organismes élémentaires» exercent une activité métabolique qui associe processus de création et de destruction organique. Ils possèdent d'une part une autonomie d'activité essentielle; d'autre part, en vertu d'une différenciation de plus en plus poussée de leurs activités fonctionnelles spécifiques, ils se trouvent subordonnés au maintien de l'unité structurale et fonctionnelle de l'organisme entier. Dans l'organisme complexe, le développement de cellules différenciées conditionne la formation du milieu intérieur, comme si la capacité organogénétique dévolue aux cellules était une condition préalable à l'émergence et à la régulation des processus physiologiques. D'un côté, grâce au milieu intérieur, chaque cellule exerce son action de façon autonome en corrélation avec toutes les autres : tout se passe alors comme si le milieu intérieur assurait la constance des stimulations exercées sur chaque cellule selon la position

86 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 358.

87 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 366.

88 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 366.

qu'elle occupe dans le système intégré des composantes de l'organisme. D'autre part, le milieu intérieur est le garant de l'intégration des cellules individuelles différenciées au tout de l'organisme, comme unité morphologique globale, et de l'intégration de leurs actions aux fonctions du tout. Bernard rattache donc la formation du milieu intérieur au plan suivant lequel se réalise l'organisme complexe et se configure chacun de ses éléments. En définitive, la conception holiste de la cellule comme objet d'analyse, à laquelle Bernard reste attaché en dernier ressort, ne lui permet pas d'envisager rompre avec les conceptions téléologiques relatives à la morphogenèse des éléments histologiques<sup>89</sup>. Il professe donc qu'au stade où se trouve le développement de la physiologie générale, l'on doit tenir cet effet des lois morphologiques pour un réquisit, alors même qu'on ne saurait agir expérimentalement sur les unités histologiques de façon à contrôler la production d'un tel effet.

« Il serait, dans l'état actuel de nos connaissances, impossible de réaliser artificiellement le *milieu intérieur* dans lequel vit chaque cellule. Les conditions de ce milieu sont tellement délicates qu'elles nous échappent. Elles n'existent que dans la place naturelle que la réalisation du plan morphologique assigne à chaque élément. Les organismes élémentaires ne les rencontrent que dans leur place, à leur poste : si on les transporte ailleurs, si on les déplace, à plus forte raison si on les extrait de l'organisme, on modifie par cela même leur milieu, et, comme conséquence, on change leur vie ou bien même on la rend impossible<sup>90</sup>. »

Comment, en définitive, interpréter la posture de Bernard concernant la ségrégation entre les déterminismes analysables des phénomènes vitaux et l'ordre des conditions morphologiques de l'organisation vitale dont on doit se contenter de décrire les effets ? La frontière tracée peut ici paraître refléter l'objectif de respecter, du point de vue de l'analyse scientifique, une distinction rigoureuse entre l'ordre des causes phénomé-

89 - Reynolds, *op. cit.* in n. 9, 77, range Bernard avec Virchow et Brücke parmi les « *holistic materialists* » et le justifie ainsi : « *[He] insisted on the importance of the mutual interactions of the cell, tissue, and organ units on one another in their creation of a milieu intérieur effectively staking out an irreducibly biological approach to the study of physiology that employed the methods of chemistry without supposing that the phenomena of interest are wholly reducible to chemistry and physics.* »

90 - Bernard, *op. cit.* in n. 22, I, 360.

nales prochaines et l'ordre des causes premières, situé hors du champ des phénomènes que l'on peut actuellement observer et sur lesquelles on peut agir expérimentalement. Or ne pourrait-on légitimement soutenir que la frontière ainsi dessinée n'est que provisionnelle et que l'extension de la théorie cellulaire pourrait déboucher sur la compréhension causale des modes de reproduction des cellules et des facteurs déterminants de l'hérédité? L'œuvre tardive de Bernard suggère que, s'il a fourni des indices d'ouverture à cette conjonction éventuelle de procédures analytiques de part et d'autre, il a tendu à maintenir une distinction épistémologique forte entre une morphologie vouée pour l'essentiel à la description des effets de formation et de transformation des structures cellulaires et organismiques, et une physiologie, expérimentale et explicative, dévoilant les mécanismes de la vie des organismes et de leurs éléments histologiques.

## Conclusion

Mon intention était de scruter la distinction que Bernard traçait entre les processus de la vie cellulaire analysables en leurs facteurs déterminants et ceux du développement des «organismes élémentaires» ressortissant à des lois morphogénétiques latentes. Une telle distinction peut concerner, d'une part, ce qui peut s'intégrer au corpus d'une physiologie cellulaire scientifiquement fondée, d'autre part, ce que l'on doit reléguer au domaine des principes méta-empiriques, car Bernard s'est toujours soucié de maintenir une rigoureuse séparation conceptuelle entre l'ordre des causes phénoménales et proximales, objets de nos observations et de nos expériences, et celui des causes premières, situées hors du champ actuel des phénomènes. Peut-on cependant tenir la distinction ainsi tracée pour provisionnelle et méthodologique et présumer que de futurs développements de la physiologie cellulaire permettraient d'atteindre une compréhension approfondie des mécanismes de reproduction et de transformation cellulaire, et des facteurs déterminants de l'hérédité? Il y avait de fait plus d'ouverture en ce sens au stade antérieur de la physiologie cellulaire bernardienne : dans le *Rapport sur les progrès et la marche de la physiologie générale en France* (1867), Bernard visait en

particulier à formuler des «lois organotrophiques» pouvant rendre compte des mécanismes positivement identifiés du développement organique. Ultérieurement, dans les *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (1878), Bernard semble dissocier plus strictement la description morphologique des éléments histologiques, basée sur des lois morphologiques latentes, et la physiologie cellulaire, expliquant les phénomènes de création et de destruction organique par l'«irritabilité» protoplasmique et ses modes. Sans doute ne peut-on interpréter de façon univoque une telle dichotomie épistémologique. Bernard envisageait en effet de soutenir l'indispensable corrélation des points de vue morphogénétique et physiologique. Il se représentait, semble-t-il, que la structure organique et les propriétés du protoplasme cellulaire impliquaient une organisation structurale et fonctionnelle telle que sa formation et ses transformations ne pouvaient se réduire aux simples effets de mécanismes «organotrophiques». D'un point de vue méthodologique, Bernard pourrait s'être représenté que sa physiologie cellulaire se conformerait d'autant mieux aux normes de l'explication scientifique qu'elle écarterait toute notion causale spéculative sur la morphogenèse des organismes élémentaires et se concentrerait sur l'explication déterministe des processus déployés par les cellules développées. Dans le même temps, il ne laissait pas de suggérer que la constitution morphologique des organismes devait être considérée comme orientée en vue de la formation et des opérations intégratives vitales des cellules conçues comme autant d'organismes élémentaires complexes. Sans envisager de pouvoir les réduire les unes aux autres, il entendait donc associer en une même conception théorique des propositions de statut épistémologique différent : la «loi de la construction des organismes et du perfectionnement organique» et les «lois de la vie cellulaire».



# Le concept de communauté et le projet écologique d'Eugen Warming (1841-1924)

Patrick Matagne \*

**Résumé :** Le botaniste danois Eugen Warming (1841-1924) est l'auteur du premier traité d'écologie, fondé sur une longue tradition de la géographie botanique qui traverse le XIX<sup>e</sup> siècle. Son programme de recherche des causes de la distribution des espèces donne une place centrale à leurs modalités de groupements. Il construit et enrichit le concept de communauté en référence à Alexander von Humboldt et par des emprunts au commensalisme défini par le zoologiste belge Van Beneden. Les options théoriques de Warming, notamment en référence au lamarckisme et au darwinisme, ainsi que ses convictions politiques et religieuses, font du concept de communauté de vie un instrument au service de son engagement dans le projet écologique du Danemark.

**Mots-clés :** botanique; histoire de l'écologie; communauté; commensalisme; théories évolutionnistes.

**Summary:** *The Danish botanist Eugen Warming (1841-1924) is the author of the first treatise on ecology, based on a long tradition of botanical geography that spans the 19th century. His programme of research into the causes of the distribution of species gives a central place to the way they are grouped. He constructed and enriched the concept of community with reference to Alexander von Humboldt and by borrowing from the commensalism defined by the Belgian zoologist Van Beneden. Warming's theoretical options, particularly in reference to Lamarckism and Darwinism, as well as his political and religious convictions, make the concept of community of life an instrument at the service of his commitment to the Danish ecological project.*

**Keywords:** *botany; history of ecology; community; commensalism; evolutionist theories.*

## Introduction

Après un travail pionnier sur la géographie biologique des plantes de Lagoa Santa (Brésil) en 1892, le botaniste danois

\* Patrick Matagne, univ. de Poitiers, 15, rue de l'Hôtel Dieu, 86073 Poitiers. Courriel : [patrick.matagne@univ-poitiers.fr](mailto:patrick.matagne@univ-poitiers.fr).

Eugen Warming (1841-1924) publie le premier traité d'écologie, qui lui confère une notoriété internationale. À la suite des différentes éditions, danoise en 1895, allemande (1896), polonaise (1900), russe (1901), puis anglaise sous une forme révisée et augmentée (1909), le terme écologie devient incontournable. Il va désormais être utilisé par les phytogéographes et la première génération de spécialistes de l'écologie du xx<sup>e</sup> siècle, en Europe et aux États-Unis. Ils explorent et développent le programme de recherche des causes de la distribution géographique des plantes présenté par Warming dans son traité, et se réfèrent à son système de classification des grandes formations végétales. Dans ce système, Warming donne une place centrale au concept de communauté, qu'il a commencé à élaborer dans les années 1860.

Quelles sont les bases scientifiques sur lesquelles Warming construit et enrichit le concept de communauté végétale ? Comment devient-il un instrument au service de son engagement dans le projet écologique du Danemark, en cohérence avec ses convictions politiques et religieuses ?

## La communauté végétale au centre de la géographie botanique écologique

*Plantefund* est associé au terme *ökologiske* dans le titre de l'édition danoise de 1895. *Plantefund* peut aussi bien être traduit en français par « communauté » ou « société », ici de plantes ou végétale<sup>1</sup>.

Warming commence à structurer son concept de communauté au cours d'un séjour de près de trois ans (juillet 1863 – avril 1866) effectué au Brésil dans la région de Lagoa Santa (Minas Gerais). Étudiant, il a accepté l'offre d'un de ses professeurs de l'université de Copenhague de devenir le secrétaire du zoologue, botaniste et paléontologue danois Peter Wilhelm Lund (1801-1880), installé au Brésil. Warming explore en profondeur un secteur de 170 km<sup>2</sup> dont il inventorie la flore et identifie les différentes

1 - Eugen Warming, *Plantefund : Grundtræk af den økologiske plantegeografi* (Copenhague : P. G. Philipsen, 1895).

formes de groupement des plantes, expérimentant des méthodes d'étude qu'il confortera au cours de sa vie.

Les régions tropicales jouent un rôle crucial dans le développement de l'écologie, au moins depuis les recherches de l'explorateur et géographe allemand Alexander von Humboldt<sup>2</sup> (1769-1859). Dans le cas de Warming, qui séjourne à plusieurs reprises sous les tropiques à partir des années 1890 (Petites Antilles, Antilles danoises, Venezuela), elles lui permettent notamment de découvrir de nouveaux types de communautés végétales et d'établir des comparaisons avec celles des latitudes tempérées qu'il connaît déjà, ou encore subarctiques et arctiques, qu'il étudie à partir des années 1880 (Groenland, Laponie, îles Féroé, Islande).

L'étude des formes de groupement observées sous des latitudes et à des altitudes différentes l'ont convaincu que les communautés de plantes doivent être au centre de son programme de recherche, exposé dans l'introduction de son traité de 1895<sup>3</sup> :

« Une espèce n'est pas répartie uniformément sur une surface donnée, mais plutôt dans des communautés aux physionomies très différentes. La première tâche, la plus simple, consiste à déterminer quelles espèces sont réunies dans des endroits similaires (stations). Une autre tâche, pas difficile non plus, est de décrire la physionomie de la végétation et du paysage; de nombreux chercheurs allemands et scandinaves y ont été récemment confrontés. La tâche suivante et très difficile consiste à répondre aux questions : pourquoi les espèces se regroupent-elles en communautés définies ? Pourquoi chacune [des communautés] présente-t-elle une physionomie caractéristique ? Ce qui nous amène aux questions sur l'économie des plantes, leurs exigences vis-à-vis du milieu et les modes d'adaptation aux conditions extérieures de leurs structures internes et de leurs physionomies, ce qui conduit à considérer leurs formes de vie (*livsformerne*). »

Ce programme s'inspire de celui que Humboldt, souvent cité par

2 - R.J. Goodland, The Tropical origin of ecology : Eugen Warming's jubilee, *Oikos*, 26/2 (1975), 240-245. Alexander von Humboldt, *Essai sur la géographie des plantes* (Paris / Tübingen : Schoell / Gotta, 1807).

3 - Warming, *op. cit.* in n. 1, 1-2. Langue d'origine, danois. Les différentes citations de cet article sont traduites par l'auteur.

Warming, a ouvert près d'un siècle avant lui. Humboldt identifie des « plantes sociales », des « associations » dans lesquelles les plantes sont « réunies en société comme les fourmis et les abeilles ». Il cite par exemple <sup>4</sup> l'« association de l'*Erica vulgaris*, de l'*Erica tetralix*, des *Lichen icmadophila* et *hoematomma* [des bruyères et des lichens] ». Sur le plan physionomique, « dans la variété des végétaux qui couvrent la charpente de notre planète, on distingue sans peine quelques formes générales auxquelles se réduisent la plupart des autres ». Ces observations donnent lieu à l'identification de quinze groupes physionomiques <sup>5</sup>.

Ainsi, une communauté végétale peut être définie de deux façons : par sa composition floristique, et par sa physionomie. Dans le premier cas, elle est reconnue par ses espèces caractéristiques. Par exemple, le gaillet à feuilles rondes (*Galium rotundifolium*) est une espèce caractéristique de certaines hêtraies sur sol acide dans les Vosges, le Massif central, les Alpes, les Pyrénées et la Corse <sup>6</sup>. Dans le second cas, la hêtraie peut être identifiée par sa physionomie, imprimée au paysage végétal par quelques espèces dominantes comme le hêtre commun (*Fagus sylvatica*) associé au sapin (*Abies alba*). Le *Galium*, herbacée de 15 à 30 cm aux fleurs blanches (de mai à septembre) de quelques millimètres de diamètre, attire le regard du botaniste ou du promeneur en sous-bois, mais ne marque pas la physionomie de la communauté végétale.

Les deux lignes de recherche inaugurées par Humboldt, floristique et physionomique, donnent lieu à deux traditions de la géographie botanique, identifiées au cours du siècle par des auteurs, des références théoriques et des méthodologies qui se distinguent et entrent en conflit <sup>7</sup>. Ainsi, au début du XIX<sup>e</sup> siècle,

4 - Humboldt, *op. cit.* in n. 2, 15 et 17.

5 - Humboldt, *op. cit.* in n. 2, 31.

6 - Jean-Claude Rameau, Dominique Mansion, Gérard Dumé, *Flore forestière française : Guide écologique illustré*, t. II, Montagnes (Paris : Institut pour le développement forestier, ministère de l'Agriculture, 1993), 1441. Une espèce caractéristique se trouve à une fréquence significativement plus élevée dans un groupement végétal déterminé, que dans d'autres groupements.

7 - Pascal Acot, *Histoire de l'écologie* (Paris : Presses univ. de France, 1988), 96-99. Jean-Marc Drouin, *Réinventer la nature : L'écologie et son histoire* (Paris : Desclée de Brouwer, 1991), 67 sq. Patrick Matagne, The taxonomy and nomenclature of plant groups, in P. Acot (dir.), *The European origins of scientific ecology* (Routledge, 1998), vol. 2, p. 427-437.

le botaniste suisse Augustin-Pyramus de Candolle (1778-1841) inaugure un programme floristique qui passe par la constitution d'inventaires aussi exhaustifs que possible, afin d'identifier des associations par leurs espèces caractéristiques<sup>8</sup>. Les tenants de la ligne physionomique, à laquelle se rattache Warming comme l'atteste son introduction de 1895, construisent des systèmes de classification fondés sur des «divisions physionomiques [qui] n'ont presque rien de commun avec celles que les botanistes ont faites jusqu'à ce jour», pour citer à nouveau Humboldt<sup>9</sup>.

Au cours du long voyage à cheval et à dos de mule qui le conduit de Rio de Janeiro à Lagoa Santa (500 km en 42 jours), le jeune Warming se construit des images mentales des paysages traversés. Il commence à repérer des divisions physionomiques, pratique à laquelle il s'est déjà entraîné par l'étude des paysages végétaux de son Jutland natal. Ainsi, en 1864, il photographie et dessine un arbuste qui dépasse les 10 m de haut (*Piptadenia macrocarpa*) et ressemble au mimosa<sup>10</sup>. Il identifie cette espèce comme déterminant en partie la physionomie du *campo cerrado*, la savane néotropicale arborée typique des plateaux du Brésil, qui déborde aujourd'hui sur le Paraguay et la Bolivie (2 millions de km<sup>2</sup>). Warming note que les *cerrados* peuvent se trouver sur de l'argile profonde ou sur sols sablonneux. Si les différences floristiques qui en découlent n'entraînent pas de changement physionomique, il considère que la dénomination doit rester inchangée.

En quête de régularités physionomiques, il est conduit à «rattacher au même groupe physionomique [...] les forêts de *catinga* [type de forêt basse, formée d'arbres peu développés et épineux du Nord-Est du Brésil] et de la *catanduva* [désigne plusieurs espèces d'arbres du genre *Piptadenia*]. Les forêts littorales et les campos alpins s'y rattachent également.» Comparant ces formations avec celles d'autres régions de l'Amérique du Sud, il conclut que «les savanes de Guyane [il cite le botaniste allemand Richard Schomburgk] correspondent parfaitement aux campos

8 - Augustin-Pyramus de Candolle, Géographie botanique, *Dictionnaire des sciences naturelles*, 18 (1820), 259-422, réimpr. *Essai élémentaire de géographie botanique* (Strasbourg : F. G. Levrault, 1820).

9 - Humboldt, *op. cit.* in n. 2, 32.

10 - Eugen Warming, *Lagoa Santa : Et bidrag til den biologiske plantegeografi* (Copenhague : Bianco Lunos Bogtrykkeri [F. Dreyer], 1892), 34.

du Brésil<sup>11</sup> ».

Sa « contribution à la géographie biologique des plantes » de Lagoa Santa est publiée en 1892. Entre temps, alors qu'il est nommé professeur à Stockholm, il est missionné au Groenland en 1884 et publie une étude sur sa végétation<sup>12</sup> : *Om Grønlands vegetation* (1888). Son examen des grandes formations végétales boréales et arctiques le conduit à conclure que le Groenland possède deux grandes régions : celle des bouleaux, méridionale, et la région alpine, qui couvre le reste du territoire non pris par les glaces. Là aussi il établit des correspondances physionomiques, notamment avec la Norvège, et il opère des subdivisions si les espèces dominantes diffèrent. Il se réfère alors à certaines particularités de l'appareil végétatif (stolons, racines, feuilles en rosette, etc.), posant les bases d'une classification des formes de vie<sup>13</sup>.

En référence aux nombreux systèmes de classification physionomique proposés au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, celui de Warming représente un remarquable travail de synthèse et innove sur plusieurs aspects : il est construit comme un jeu d'ensembles emboîtés ; il témoigne de choix opérés à partir des systèmes précédents ; la terminologie en usage est clarifiée ; des unités nouvelles sont créées.

Après la plante vient le niveau de l'association identifiée par des critères physionomiques et secondairement par des caractéristiques floristiques. Warming précise que ces associations forment une simple accumulation d'individus. Cependant, elles constituent des unités organisées. Ces « unités organisées, d'un ordre supérieur », forment la catégorie des « groupes d'associations » (*die Vereinsklassen*), un niveau créé par Warming. Au sein de ces groupes « la physionomie est la même, ainsi que les

11 - Eugen Warming, Lagoa Santa (Brésil) : Étude de géographie botanique, *Revue générale de botanique* (1893), 156-157.

12 - Eugen Warming, *Om Grønlands vegetation, 1886-1887*, Meddelelser om Grønland, udgivne af Commissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland (Copenhague : Tolvte Hefte, 1888).

13 - Sa classification est peu précise. Elle est reprise et développée par un de ses élèves danois, Christen Christiansen Raunkiaer (1860-1938), qui propose une classification des types biologiques : Om biologiske typer, med hensyn til planternes tilpasning til at overle ugunstige aarister, *Botanisk tidsskrift*, 26/14 (1904). *Idem*, Types biologiques pour la géographie botanique, *Oversigt over det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs forhandlinger*, 5 (1905), 347-437.

formes de vie, mais les espèces peuvent être différentes<sup>14</sup> ». Par exemple, les associations du pin cembro, du sapin, de l'épicéa, sont dans le groupe d'associations d'arbres résineux à feuilles persistantes. Ces groupes restant nombreux, il propose des unités qui les rassemblent en fonction d'un facteur écologique jugé déterminant pour les plantes terrestres : l'eau. Il en ressort quatre catégories qui reprennent une terminologie déjà connue mais auxquelles il donne des critères physiologiques, biologiques et morphologiques précis<sup>15</sup> : hydrophytes (*Hydrophytenvereine*, totalement ou en partie immergées), xérophytes (*Xerophytenvereine*, adaptées aux milieux secs), halophytes (*Halophytenvereine*, adaptées aux milieux salés) et mésophytes (*Mesophytenvereine*, besoins moyens en eau ; c'est le groupe le plus important de plantes terrestres).

Le système de Warming représente un progrès théorique et pratique salué par ses contemporains. Il a vocation à être utilisé sur le terrain pour identifier des unités phytogéographiques avec la même fiabilité que les ouvrages floristiques pour l'identification des espèces. Les vertus de son système sont reconnues par les organisateurs des premiers grands congrès internationaux de botanique du début du xx<sup>e</sup> siècle, notamment ceux de 1900 (Paris) et de 1910 (Bruxelles). Ces congrès témoignent que désormais la géographie botanique écologique n'est plus centrée sur les espèces mais sur les communautés, ainsi que sur les causes environnementales immédiates et sur des expérimentations physiologiques<sup>16</sup>.

## Le commensalisme revisité

L'auteur du *Plantensamfund* et de sa traduction allemande, qui bénéficie d'une large diffusion en Europe, s'arrête sur une forme

14 - Eugen Warming, *Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie, eine Einführung in die Kenntniss der Pflanzenvereine*, trad. Emil Knoblauch (Berlin : Gebrüder Borntraeger, 1896), 109-110. La traduction allemande est conforme à l'original en danois.

15 - Warming, *op. cit.* in n. 14, 120-349.

16 - Joel B. Hagen, The development of experimental methods in plant taxonomy, 1920-1950, *Taxon : The Journal of the International Association for Plant Taxonomy*, 32/3 (1983), 406-416. J. B. Hagen, Ecologists and taxonomists : Divergent traditions in twentieth-century plant geography, *Journal of the history of biology*, 19/2 (Summer 1986), 197-214.

particulière de relations entre individus, le commensalisme (deuxième section, « La vie en communauté et les associations de plantes », chapitre 5). Il avertit ses lecteurs qu'il va faire usage du concept de commensalisme dans un sens différent de celui qui est développé par le zoologiste belge Pierre-Joseph Van Beneden (1809-1894), pour qui le commensal « est simplement un compagnon de table <sup>17</sup> ». Van Beneden cite l'exemple, parmi de nombreux autres, d'une anémone de mer (*Actinia crassicornis*) qui vit en bonne intelligence avec un poisson clown.

Le commensalisme se conçoit comme une facilitation écologique entre espèces différentes, dans laquelle le commensal est en relation avec un hôte. Le premier est bénéficiaire sans entraîner de préjudice pour le second. Comme d'autres interactions, les limites sont parfois difficiles à définir entre commensalisme, mutualisme et parasitisme. Van Beneden l'a déjà noté : « Il est souvent fort difficile de dire où le commensalisme finit et où le mutualisme commence <sup>18</sup>. » On sait que le poisson clown, protégé de ses prédateurs par les tentacules venimeux de l'anémone, lui rend quelques services en se nourrissant de débris restés sur les tentacules. Cette relation relèverait alors d'une forme de mutualisme.

Warming écrit à propos du commensalisme :

« Si une association de plantes est formée uniquement par des individus de la même espèce, par exemple des hêtres rouges et rien d'autre, ou par la bruyère, ou seulement par *Aera flexuosa* [canche flexueuse], nous avons l'exemple le plus pur. Les commensaux auront alors les mêmes exigences en matière de nourriture, de lumière et d'autres conditions de vie ; étant donné que chaque espèce demande un certain espace et que la nourriture n'est presque jamais suffisante pour tous les descendants, une concurrence alimentaire surgit entre les plantes dès que la place est occupée par le nombre d'individus qui peuvent se développer selon la nature de l'espèce. Les individus les plus défavorisés et les plus faibles sont refoulés et tués <sup>19</sup>. »

Ainsi, l'usage qu'il entend faire du concept de commensalisme

17 - Pierre-Joseph Van Beneden, *Les Commensaux et les parasites dans le règne animal* (Bruxelles : Hayer, 1875), 83.

18 - Van Beneden, *op. cit.* in n. 17, 81.

19 - Warming, *op. cit.* in n. 14, 106.



adressé au monde végétal est étendu au cas de communautés formées d'une seule espèce, alors qu'il est défini par Van Beneden comme un type d'interaction entre des individus d'espèces différentes.

Selon Warming, « l'exemple le plus pur » est donc représenté par une communauté monospécifique. Il précise que lorsque les exigences sont les mêmes (nourriture, lumière, etc.), la compétition intervient seulement quand l'abondance d'individus de la même espèce, liée à la reproduction, entraîne un manque de place et de nourriture. Autrement dit, tous les convives se nourrissent pacifiquement à la même table tant qu'il y a suffisamment de ressources.

Lorsque les commensaux sont d'espèces différentes, mais appartiennent au même genre, la cohabitation reste également pacifique, dans les limites déjà indiquées. Dans les forêts tropicales, dont la diversité biologique est grande, Warming observe que les arbres ont les mêmes capacités physiologiques et sont dans un milieu où les conditions écologiques sont optimales (sauf pour la lumière). C'est pourquoi, selon lui, le commensalisme est le type d'interaction le plus répandu. Dans certains cas, les besoins d'espèces différentes peuvent ne pas être les mêmes : ce qui est recherché par l'une est dédaigné par l'autre. Elles peuvent donc coexister sans être en concurrence.

Le succès des plantes dans la compétition dépendra souvent de circonstances fortuites, de leur biologie, leur morphologie, leur phénologie. C'est le cas de la relation entre les arbres et de nombreuses plantes du tapis forestier. Dans nos sous-bois, des espèces printanières ont déjà effectué leur cycle de développement lorsque les arbres commencent à se couvrir de feuilles, empêchant la lumière d'atteindre le sol. Warming prend pour exemples le perce-neige et deux espèces de corydale à la floraison printanière<sup>20</sup>. Certaines espèces comme le hêtre – Warming observe qu'il supplante le chêne dans les forêts d'Europe septentrionale – sont comme ces « monarques qui sont capables de dominer pleinement le territoire ». Cependant – bons princes – ils permettent à des espèces compagnes de réaliser leur cycle de développement. « Il y a donc ici commensalisme. Les individus

20 - *Galanthus nivalis*, *Corydalis solida* et *Corydalis cava*.

sont à la même table, mais dînent de plats différents [...] ou ne reçoivent pas leur nourriture en même temps.»

Ainsi, Warming transpose le concept de commensalisme et l'introduit chez les botanistes. Il relève des points communs entre les communautés végétales et humaines. Certes, les premières ne sont pas caractérisées par leur sens du bien commun, contrairement aux secondes. Cependant, les individus végétaux se trouvent souvent dans des situations écologiques dans lesquelles ils vivent en harmonie : au final, « il existe une relation de dépendance mutuelle et un respect mutuel entre les nombreux membres d'une association, les uns par rapport aux autres <sup>21</sup> ».

## L'harmonie des formes de vie

Quels sont les enjeux de cette manipulation d'un concept transféré depuis le champ de la zoologie ? L'historien de l'écologie Peder Anker montre que l'usage qu'il fait du concept de commensalisme permet à Warming de renforcer l'ancrage de ses recherches dans un cadre lamarckien. Il peut alors expliquer comment les plantes vivent ensemble sans avoir recours à l'effroyable lutte pour l'existence décrite par la théorie évolutionniste de Charles Darwin <sup>22</sup>.

C'est un point essentiel pour saisir en quoi son positionnement est sous-tendu par des convictions scientifiques et religieuses.

Parmi les causes de l'évolution des espèces, Warming ne rejette pas la sélection naturelle mais il la relègue à la troisième place, après l'adaptation et l'hérédité des caractères acquis au sens de Lamarck dans *Philosophie zoologique* (1809) et des lamarckiens, fortement représentés parmi les pionniers européens et étasuniens de l'écologie de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle <sup>23</sup>. Warming considère toutefois que la sélection au sens de Darwin renforce, dans certaines circonstances, ce qui a déjà été déterminé par l'adaptation et par l'hérédité. Elle n'est

21 - Warming, *op. cit.* in n. 14, 109-110.

22 - Peder Anker, Plant community, plantesamfund, in Astrid Schwarz, Kurt Jax (dir.), *Ecology revisited : Reflecting on concepts, advancing science* (Springer, 2011), 329.

23 - Pascal Acot, The lamarckian cradle of scientific ecology, *Acta biotheoretica*, 45/3-4 (1997), 185-193.

donc qu'une variable d'ajustement. Comme le note William Coleman, intégrer le concept de sélection naturelle en écologie impliquerait de mettre l'accent sur les facteurs biotiques et de reléguer les facteurs abiotiques au second plan, dans le processus évolutif<sup>24</sup>. Cela représenterait pour les phytogéographes du XIX<sup>e</sup> siècle, dont Warming est l'héritier, une sorte de révolution copernicienne. En effet, à quelques rares exceptions, ils donnent aux facteurs abiotiques une place centrale, dans les études qui jalonnent le siècle<sup>25</sup>.

Le modèle écologique de Warming explique les modifications des espèces végétales par leur plasticité, qui leur confère la capacité à s'adapter à leur environnement. Il s'appuie notamment sur les expérimentations conduites à la station de recherche en biologie végétale de Fontainebleau sous la direction de Gaston Bonnier (1853-1922), et sur des botanistes et physiologistes allemands qui inscrivent leurs travaux dans un cadre théorique néolamarckien<sup>26</sup>. Il se fonde principalement sur deux notions articulées : la plasticité des êtres vivants, l'enregistrement par l'hérédité des modifications acquises au cours de la vie, transmises aux descendants. Ces caractères acquis par l'individu s'additionnent pour devenir ceux de l'espèce. Le néolamarckisme établit un lien fonctionnel entre l'organisme et le milieu.

24 - William Coleman, *Evolution into ecology? The strategy of Warming's ecological plant geography*, *Journal of the history of biology*, 19/2 (1986), 181.

25 - On pourrait discuter de l'approche d'Anton Kerner von Marilaun, *Das Pflanzenleben der Danauländer* (Innsbruck : Wagner, 1863). Il innove en étudiant les groupements végétaux selon leurs propres caractéristiques phytionomiques et leur composition floristique. Dans son système de classification, l'environnement n'est plus premier. Voir à ce sujet : Acot (1988), *op. cit.* in n. 7, 98-99.

26 - Louis Dufour, *Le laboratoire de biologie végétale de Fontainebleau*, *Revue générale de botanique*, 25 bis (vol. spécial « Travaux de biologie végétale : Livre dédié à Gaston Bonnier par ses élèves et amis », 1914), 1-9. Laurent Loison, *Le projet du néolamarckisme français (1880-1910)*, *Revue d'histoire des sciences*, 65/1 (2012), 61-79. Auteurs allemands cités par Warming : Georg Volkens (les réponses des plantes aux conditions du désert égypto-arabe); le physiologiste Julius von Sachs (l'influence de la lumière sur la photosynthèse et la production d'amidon); Christian Ernst Stahl (développement des lichens et des champignons); Karl von Göbel (adaptation des formes aux fonctions); Hermann Vöchting (physiologie et pathologie végétales); Georg Karsten (phytoplankton antarctique); Eugen Askenasy (influence du milieu sur la croissance des plantes); Georg Klebs (hérédité des modifications sous l'influence du milieu, étude des palétuviers); N. Lewakoffsky (influence de l'eau); Paul Gräbner (ou Graebner, développement des formations végétales en lien avec l'environnement); Albert Frank (physiologie végétale appliquée à l'agronomie); Heinrich Schenck (production d'un aérénchyme, tissu aérifère formant un canal chez certaines plantes tropicales des mangroves).

Pour Warming, dans *Oecology of plants* (1909), version anglaise augmentée et actualisée de son traité de 1896, « la structure et l'ensemble du développement des espèces sont en parfaite harmonie (épharmonie) avec l'environnement ». Il pose alors la question : « Comment cette épharmonie est-elle apparue<sup>27</sup> ? »

Dans le dernier chapitre il résume les apports de Darwin, ceux du botaniste et généticien russe Sergei Ywanowitsch Korschinski (1861-1900), directeur du jardin botanique de Saint-Petersbourg, et ceux du botaniste néerlandais Hugo de Vries (1848-1935), inventeur du terme mutation. Warming les oppose à Lamarck, notamment en raison de la place laissée au hasard par la sélection naturelle et les mutations.

Pour Warming, la « nature » choisit parmi les individus ceux qui sont adaptés. Il reprend ici une démonstration faite un an plus tôt dans *Om planterigets livsformer* (les formes de vie du règne végétal). Il explique que les caractères maintenus au cours des générations sont ceux qui s'avèrent utiles. Le résultat est l'harmonie entre les structures et les fonctions, entre les organismes et leur environnement. La compréhension de l'origine des espèces passe alors par celle de l'harmonie des formes de vie.

Les causes profondes de cette harmonie sont exposées dans les dernières lignes d'*Oecology of plants* :

« Les plantes possèdent une force inhérente particulière ou une faculté par l'exercice de laquelle elles s'adaptent directement aux nouvelles conditions, c'est-à-dire qu'elles changent de manière à devenir adaptées à l'existence en fonction de leur nouvel environnement<sup>28</sup>. »

Cette vision téléologique des phénomènes naturels exaspère le botaniste britannique de l'université de Cambridge, Arthur Tansley (1871-1955), qui compte pourtant parmi ses premiers admirateurs depuis sa lecture, en 1898, de la traduction allemande du traité de Warming :

27 - Eugen Warming, *Oecology of plants : An introduction to the study of plant communities* (Oxford : Clarendon Press, 1909), 369. Il se réfère au concept d'épharmonie du botaniste darwinien Julien Vesque (1848-1895), revisité à l'aune du lamarckisme par Warming et d'autres botanistes.

28 - Warming, *op. cit.* in n. 27, 370.

*Le concept de communauté et le projet écologique d'E. Warming*

« L'appel à une "force ou faculté inhérente" généralisée qui permet à une plante de réagir utilement à elle-même quelle que soit la nature du stimulus semble en réalité équivaloir à un abandon franc de la méthode scientifique<sup>29</sup>. »

*Oecology of plants* se conclut ainsi :

« L'adaptation directe est sans aucun doute le facteur le plus puissant de l'évolution du monde organique, et elle semble jouer un rôle de premier plan dans l'adaptation des formes de croissance et des formations. Son étude permettra de dissiper une partie de l'obscurité qui entoure le mystère de la vie, même si nous ne pouvons espérer atteindre le cœur de ce mystère<sup>30</sup>. »

Le « mystère de la vie » est présent dans les lectures critiques de la théorie de l'évolution faites par le professeur Warming à la Maison des étudiants, dont il est membre du conseil. Il manifeste sa sympathie aux étudiants qui défendent la foi évangélique contre le darwinisme<sup>31</sup>.

Ses positions scientifiques et religieuses sont didactisées dans *Nedstammingslæren* [La doctrine de la descendance], un manuel publié en 1915, destiné aux enseignants et élèves des écoles secondaires populaires<sup>32</sup> (*folkehøjskole*). Il dresse un tableau complet de l'histoire de la vie sur Terre et des différentes théories sur cette question, il fait la promotion de Lamarck et il lève le voile sur cette « nature » qui choisit :

« Dans le monde vivant, la création de la Terre est un processus qui s'inscrit dans le cadre de l'histoire de l'humanité; une évolution est en cours, qui est également aussi bien régie par des lois fixes que le monde inanimé des apparences multiples<sup>33</sup>. »

En somme, sa lecture de la *Philosophie zoologique* le conduit

29 - Arthur George Tansley, Review of the oecology of plants and introduction to the study of plant communities, *The New phytologist*, 8/5-6 (1909), 225. Il fonde et préside la *British Ecological Society* en 1913, et il crée le terme écosystème en 1935.

30 - Warming, *op. cit.* in, n. 27, 373.

31 - Thomas F. Glick, Elinor Shaffer, et al., *The Literary and cultural reception of Charles Darwin in Europe* (Londres : Bloomsbury Academic, 2014), 138 et 150.

32 - Didactiser s'entend ici comme un processus par lequel un savoir savant est transposé pour le rendre enseignable sur le plan des contenus, de leur présentation et de leur place dans une progression.

33 - Warming, *Nedstammingslæren* (Copenhague : Udvalget til Folkeoplysningens Fremme, G. E. C. Gad, 1915), 87.

à privilégier l'idée que les modifications utiles, renforcées par l'usage et l'hérédité des caractères acquis, confèrent une meilleure adaptation des plantes au milieu. Cette lecture lui permet de mettre en cohérence son approche scientifique du vivant avec sa croyance en un plan d'essence divine, qui vise l'harmonie des relations entre les communautés végétales et leur environnement. Avec d'autres protestants danois, il défend l'idée d'une évolution théiste<sup>34</sup>.

Les activités humaines, elles aussi, contribuent à l'harmonie des formes de vie, dont Warming rend compte par une approche historique des différentes formations et communautés végétales<sup>35</sup>. S'il remet en cause certaines pratiques, il considère qu'elles appartiennent au passé : « Une exploitation forestière imprudente et ignorante, l'utilisation du bois du Jutland au Moyen Âge, l'extraction à grande échelle du minerai de fer et les vents d'ouest ont balayé la forêt<sup>36</sup>. » Désormais, grâce aux progrès de la science, à l'essor de l'agriculture et de l'élevage, la productivité des prairies littorales est remarquable, le pays est devenu riche et fertile, les habitants prospères, et la nature florissante.

## Un projet écologique patriotique

Entre le départ de Warming pour le Brésil et son retour, la seconde guerre des Duchés ou seconde guerre prusso-danoise (janvier-octobre 1864) se solde par la perte des duchés du Lauenbourg et surtout du Schleswig et du Holstein par le Danemark, au profit de la Confédération germanique<sup>37</sup>. Très affecté, Warming devient ouvertement anti-prussien. Plus tard, son engagement politique se manifeste notamment par sa contri-

34 - Hans Henrik Hjermitsev, Protestant responses to Darwinism, 1859-1914, *Journal of the history of ideas*, 72/2 (2011), 294.

35 - Warming, *op. cit.* in n. 14, 376.

36 - Warming, *op. cit.* in n. 14, 369. Sa dénonciation utilise les mêmes mots que George Perkins Marsh (1801-1882) qui, quant à lui, analyse les pratiques de son époque dans *Man and nature, or physical geography as modified by human action* (Londres : Sampson Low, 1864).

37 - Confédération germanique (1815-1866); victoire de la Prusse sur l'Autriche et création de la confédération de l'Allemagne du Nord (1867-1871) constituée de 22 États; Empire allemand (Deuxième Reich (1871-1918) après la victoire de l'Allemagne sur la France de Napoléon III.

bution financière à un fonds secret, afin d'aider les agriculteurs danophiles du Jutland à acquérir des fermes<sup>38</sup>.

À partir des années 1880, le professeur Warming est reconnu au niveau national et international. Au Danemark, il occupe des responsabilités dans des institutions prestigieuses. Ainsi, il devient membre du conseil d'administration de la puissante Fondation Carlsberg (1889) qui dispose d'un laboratoire de physiologie, soutient d'importantes missions, expéditions et publications scientifiques<sup>39</sup>. Il enseigne à l'université de Copenhague (à partir de 1886), dirige le jardin botanique, est membre actif de plusieurs sociétés savantes. À la Fondation comme dans toutes les institutions auxquelles il appartient, il manifeste la volonté de travailler pour la science, le bien et l'honneur de son pays. Il ne fait pas mystère de ses positions et engagements politiques et religieux – il est luthérien, patriote, conservateur – en cohérence avec son projet scientifique, qui consiste à inventorier les ressources naturelles du Danemark et des territoires sous sa dépendance (Groenland, Islande, îles Féroé, Antilles occidentales), afin de favoriser leur valorisation.

«Au cours de l'été 1889, j'ai visité mon île natale, Mane [Mandø<sup>40</sup>], et j'ai fait la connaissance de ses habitants. En observant la formation des marais et en apprenant les expériences des habitants à ce sujet, j'ai réalisé qu'il y avait ici des questions biologiques intéressantes qui méritaient d'être examinées, en particulier la contribution des plantes à la formation du sol, les raisons de leur disposition en ceinture et les luttes entre les différentes communautés. Cette visite a permis de concrétiser un projet que j'avais en tête depuis que mon séjour à Lagoa Santa et ma visite au Groenland m'avaient initié aux études écologiques, à savoir étudier les communautés végétales du Danemark<sup>41</sup>.»

Il considère alors la dynamique écologique des communautés végétales et animales.

38 - Erik Strange Petersen, Foreningen af 5 Oktober 1898, og den nationale jordkamp i Nordslesvig, *Sønderjyske årbøger udgivet af Historisk Samfund for Sønderjylland*, 84 (1972), 80-146.

39 - Bo Poulsen, *Global marine science and Carlsberg : The golden connections of Johannes Schmidt (1877-1933)* (Leiden / Boston : Brill, 2016).

40 - Une île de la mer des Wadden.

41 - Eugen Warming, *Dansk plantevækst*, vol. 1, «Strandvegetation» (Copenhague / Oslo : Gyldendalske Boghandel Nordisk Forlag, 1906), iii.

On peut d'ailleurs noter que Warming contribue à faire connaître des travaux qui ouvrent la voie à cette approche de l'écologie, alors que, traditionnellement, les auteurs de l'Europe continentale en donnent une vision statique<sup>42</sup>. Autrement dit, ils s'intéressent plus aux états adaptés des plantes et des communautés végétales qu'au processus de succession, aux transitions, étudiées par les écologues des États-Unis. Parmi les plus marquants de cette nouvelle génération, on peut citer Henry Chandler Cowles (1869-1939) et Frederic Edward Clements (1874-1945). Le premier écrit que les observations de Warming sur les rives des étangs et des mares du Jutland occidental ont déterminé son sujet d'étude pour sa thèse de doctorat (Ph. D.) en écologie végétale, sur les relations écologiques de la végétation des dunes des rives du lac Michigan<sup>43</sup>. Selon Clements, professeur à l'université du Minnesota et botaniste de l'État, Warming est le premier à avoir initié une approche de la succession de la végétation des dunes<sup>44</sup>. D'autres, botanistes et zoologues, se réclament du botaniste danois pour développer, après lui, un point de vue dynamique en écologie<sup>45</sup>.

Au travers d'études de cas, Warming décrit les processus naturels et anthropiques impactant les formations qui ont vocation à être exploitées ou le sont déjà. Explorant les prairies littorales, des dépressions de taille et de forme variées attirent son attention. Certaines sont sèches, d'autres remplies d'eau ou de boue, parfois envahies d'algues marines ou d'eau saumâtre, parmi lesquelles vivent de nombreux petits animaux. Par exemple, avec la collaboration d'un collègue zoologue, il identifie des associations d'algues peuplées de coléoptères, d'hyménoptères et de

42 - Warming cite notamment le botaniste et explorateur Auguste de Saint-Hilaire, le botaniste autrichien Anton Joseph Kerner von Marilaün. Voir à ce sujet Jean-Marc Drouin, Histoire et écologie végétale : Les origines du concept de succession, *Écologie*, 25/3 (1994), 147-155. Stephen Trudgill, The interactions between all neighbouring organisms : The roles of Charles Darwin, Ernst Haeckel and Eugenius Warming in the evolution of ideas on plant dynamics, *Progress in physical geography*, 36/6 (2012), 853-861. *Idem*, Nature's clothing and spontaneous generation? The observations of Thoreau and Dureau de La Malle on plant succession, *Progress in physical geography*, 36/5 (2012), 707-714.

43 - Henry Chandler Cowles, *The Ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan* (Chicago : The University of Chicago Press, 1899).

44 - Frederic Edward Clements, *Plant succession : Analysis of the development of vegetation* (Washington : Carnegie Institution of Washington, 1916), 23.

45 - Notamment Conway McMillan, Charles Chase Adams, Roscoe Pound, Victor Ernest Shelford aux États-Unis; Tansley en Grande-Bretagne.



nématodes<sup>46</sup>. Il déclare s'être longtemps interrogé sur l'origine et la dynamique de ces dépressions. Il développe plusieurs hypothèses, jugées innovantes par ses contemporains et discutées pendant des décennies, bien au-delà du Danemark<sup>47</sup>.

Ces recherches fondamentales débouchent sur des considérations économiques de la plus haute importance. Une réflexion de Warming résume les enjeux : « Qu'elles [les dépressions] soient dues à l'attaque de la mer est assez certain, et qu'elles ne soient pas les bienvenues pour les propriétaires des prairies l'est tout autant<sup>48</sup>. » C'est au prix d'une « lutte acharnée contre la mer » que les paysans des marais ont su « empêcher que ce qui a été formé ne soit englouti ». Warming donne son avis sur la pertinence des aménagements<sup>49</sup> :

« La construction de digues est un art en soi. En plus de la digue elle-même, il faut souvent construire des écluses, des portes par lesquelles les cours d'eau peuvent s'écouler à marée basse, mais qui se ferment à marée haute. Quand on pense à tous les changements que l'homme a apportés, et apporte chaque année, à la côte de la mer du Nord, on comprend combien ce vieux mot est vrai : "Dieu a fait la mer, mais la Frise a fait le rivage" ("Deus mare, Friso littora"). On pourrait ajouter à cela : "La mer a formé les marais, le vent les dunes." »

Des questions écologiques et économiques se posent, des considérations pédologiques et floristiques entrent en ligne de compte. On pourrait, suggère-t-il, endiguer lorsque la terre est suffisamment haute pour ne pas être inondée pendant les crues printanières habituelles, ou lorsque le trèfle commence

46 - Eugen Warming, *Bidrag til vadernes, sandenes og marskens naturhistorie*, avec la collaboration de Wesenberg-Lund, E. Østrup, *et al.* (Copenhague : Bianco Lunos Bogtrykkeri, 1904), 43-47. Carl Jørgen Wesenberg-Lund (1867-1955), zoologiste, est un pionnier de la limnologie et de la conservation de la nature au Danemark. Le botaniste et phycologue Ernst Vilhelm Østrup (1845-1917) étudie les diatomées.

47 - Richard Henri Yapp, D. Johns, O. T. Jones, The salt marshes of the Dovey estuary, *Journal of ecology*, 5/2 (1917), 65-103. Yapp, The Dovey salt marshes in 1921, *Journal of ecology*, 10/1 (1922), 18-23. Niels Nielsen, Nogle bemaerkninger om marskdannelsen i det dansk Vadehav, *Geografisk tidsskrift*, 41 (1938), 123-124. T. G. Reidenbaugh, W. C. Banta, W. C., Origin and effects of *Spartina* wrack in a Virginia salt marsh, *Gulf research reports*, 6/4 (1980), 393-401. J. Bartholdy, Salt marsh sedimentation, in R. A. Davis Jr, R. W. Dalrymple (dir.), *Principles of tidal sedimentology* (Springer, 2012), 157.

48 - Warming, *op. cit.* in n. 41, 45.

49 - Warming, *op. cit.* in n. 41, 275.

à s'installer, témoignant de la formation d'une prairie pérenne qui sera pâturée ou convertie en terre arable sans qu'il ait été nécessaire de semer des graines de graminées. Autrement dit, il est pertinent d'interroger la nature elle-même avant de prendre des décisions.

Au début du xx<sup>e</sup> siècle, il s'implique plus fortement dans des actions de conservation de la nature au Danemark, au sein d'instances officielles qui le sollicitent où qu'il crée lui-même<sup>50</sup>. En 1905 se tient à Copenhague une réunion à laquelle sont conviées la Société botanique, la Société d'histoire naturelle et la Société géologique danoises. Il résulte de cette rencontre – au cours de laquelle le professeur allemand Hugo Conwentz<sup>51</sup> (1855-1922), grand défenseur de la nature, est invité à donner une conférence – la création d'un Comité de conservation de la nature, présidé par Warming. Il indique qu'il est souhaitable de conserver une plus grande étendue continue de lande à bruyères afin de garder, pour la postérité, l'image fière de la poésie du Jutland, de préserver le souvenir du travail remarquable des fermiers cultivant ce pays depuis des siècles.

« Nous espérons qu'une grande partie du Jutland, avec ses bruyères brunes, ses broussailles de chênes et ses landes, ses hérons, ses vipères et autres animaux sauvages, sera déclarée parc national protégé pour tous<sup>52</sup>. »

Il préside le nouveau Conseil de la conservation de la nature créé en 1917, dans le cadre de la première loi sur la conservation de la nature votée par le parlement. Parmi d'autres dossiers, Warming est sollicité le 19 juin 1919 par le ministère de l'agriculture sur la conservation de la forêt de Dyrehaven, au nord de Copenhague,

50 - Pour une réflexion sur le conservationnisme et le préservationnisme, Donato Bergandi, Patrick Blandin, De la protection de la nature au développement durable : Genèse d'un oxymore éthique et politique, *Revue d'histoire des sciences*, 65/1 (2012), notamment « Gifford Pinchot contre John Muir : Conserver n'est pas préserver », 109-116.

51 - Hugo Conwentz, *Die Gefährdung der Naturdenkmäler und Vorschläge zu ihrer Erhaltung. Denkschrift, dem Herrn Minister der geistlichen, Unterrichts- und Medizinalangelegenheiten überreicht* (Berlin : Gebrüder Borntraeger, 1904).

52 - Ébauche de rapport rédigé par Warming en 1905, cité par : Signe Prytz, *Warming botaniker og rejsende* (Lyngby : Bogan, 1984), 138. Dans cette biographie, l'auteur s'est notamment appuyée sur des lettres de son grand-père. Warming connaît peut-être l'existence des espaces protégés aux États-Unis (Yellowstone en 1872, Sequoia et Yosemite en 1890) ou en Australie (Parc national royal, 1879).

une réserve de chasse royale devenue un parc forestier.

## Conclusion

Le système de classification écologique de Warming inspire les travaux du congrès international de botanique de Bruxelles (1910), qui définit l'association comme « un groupement végétal de composition floristique déterminée, présentant une physionomie uniforme et croissant dans des conditions stationnelles également uniformes. L'association est l'unité fondamentale de la synécologie. » Le congrès précise que « l'écologie comprend l'étude des conditions du milieu et des adaptations des espèces végétales, soit prises isolément (autoécologie), soit réunies en associations (synécologie, ou étude des formations) ». Cette définition sera transposée à l'écologie animale.

La notion de formation végétale reprise d'*Oecology of plants* devient « l'expression actuelle de conditions de vie déterminées. Elle se compose d'associations qui dans leur composition floristique sont différentes, mais qui correspondent à des conditions stationnelles semblables et revêtent des formes de végétation analogues <sup>53</sup>. » Ces définitions témoignent de la tension séculaire entre les lignes physionomique et floristique. La seconde va s'imposer à partir des années 1920 <sup>54</sup>.

Warming a une compréhension scientifique et religieuse des formes de vie en général, des communautés humaines et de plantes en particulier. En référence au commensalisme de Van Beneden et au concept d'adaptation, au sens lamarckien, pour Warming, les communautés végétales évoluent progressivement, en harmonie avec leur environnement.

Le traité d'écologie de Warming inspire des recherches innovantes en Europe et aux États-Unis et, au Danemark, l'expertise de son auteur sur l'écologie des communautés végétales est mobilisée en vue d'une conservation et d'une gestion durables

53 - Émile de Wildeman, *Actes du III<sup>e</sup> congrès international de botanique de Bruxelles* (Bruxelles : De Boeck, 1910), 121, 122 et 123.

54 - Josias Braun, Ernst Furrer, Remarques sur l'étude des groupements de plantes, *Bulletin de la société languedocienne de géographie*, 36 (1913), 20-41, article fondateur de la phytosociologie.

des ressources naturelles. En même temps, les positions de Warming donnent lieu à des controverses sur sa conception relative aux interactions entre les êtres vivants et leur évolution. Certes, elles sont gouvernées par des lois terrestres, mais il subsistera toujours une part de mystère. Quelle que soit l'hypothèse envisagée, écrit-il dans *Nedstammingslæren* en 1915, elle ne fait que différer ou contourner la grande question : comment la vie est-elle apparue pour la première fois ? Warming ajoute aussitôt :

« Qui sommes-nous pour vouloir percer le mystère du Tout-Puissant, créateur de la matière, de l'énergie, du temps et de l'espace<sup>55</sup> ? »

55 - Warming, *op. cit.* in n. 33, 17.

# La réflexivité géologique des sciences modernes : De l'activité humaine dans la géologie (xix<sup>e</sup> – début xx<sup>e</sup> s.)

Pierre de Jouvancourt \*

**Résumé :** Esquissant une généalogie du concept d'Anthropocène, cet article analyse les thèses se rapportant à l'action géologique de l'humanité durant le xix<sup>e</sup> siècle et le début du xx<sup>e</sup> siècle au sein d'un corpus de géologues. Deux moments sont d'abord distingués : le premier montre la présence d'un âge humain sur le plan de la temporalité propre à l'histoire de la Terre ; le second montre l'intérêt progressif des géologues pour la prise en compte de la matérialité de l'action humaine au niveau géologique. Enfin, cet article examine la question de l'action humaine dans le contexte plus large de l'invention du Quaternaire et de l'Holocène à partir de la fin du xix<sup>e</sup> siècle. En conclusion, nous insistons sur une forme de réflexivité géologique de long cours dans les savoirs modernes.

**Mots-clés :** géologie ; Anthropocène ; réflexivité environnementale ; Lyell ; Chamberlin ; Haeckel ; histoire environnementale.

**Summary:** Grounded on a corpus of geologists, this article analyzes how geological agency of humanity as a theme of discourse during the 19th and early 20th century. Firstly, we show that history of Earth included a temporal unit dedicated to humanity very early in geology history. Secondly, the materiality of human geological agency is gradually characterized during the second half of the 19th century. Thirdly, we analyze how human geological activities are taken into account in the wider context of Quaternary and Holocene invention after the end of the 19th century. Finally, we underline that modern knowledge included a long-term geological reflexivity, a fact rarely taken into account in the Anthropocene humanities.

**Keywords:** geology; Anthropocene; environmental reflexivity; Lyell; Chamberlin; Haeckel; environmental history.

*The earlier geologists were inclined to regard man's agency in geological progress as rather trivial, perhaps because physiographic geology, in which his influence is felt chiefly, was then less studied*

\* Pierre de Jouvancourt, univ. Paris-1-Panthéon-Sorbonne, 12, place du Panthéon, 75005 Paris. Courriel : pierre.dejouvancourt@gmail.com.

*than other phases with which he has little to do. The fact probably is that no previous agent, in an equal period of time, has so greatly influenced the life of the land, or the rate of land-degradation, as man has since the agricultural epoch was well established. That this influence will be increased during coming centuries seems clear*<sup>1</sup> (Chamberlin et Salisbury, 1914).

## Introduction

Née au début des années 2000, la notion d'Anthropocène a connu un fort succès à la fois dans les travaux de sciences humaines et sociales et dans l'espace public, notamment à partir de la seconde moitié des années 2010. Depuis, elle éte tour à tour mobilisée comme candidate à la périodisation historique, comme manière d'interroger les frontières disciplinaires ou encore comme signal d'une rupture fondamentale dans les représentations dominantes du monde moderne, remettant notamment en question le partage nature / société<sup>2</sup>. L'événement « Anthropocène » ne serait donc pas seulement celui d'une modification profonde des conditions géologiques de l'Holocène, mais aussi un *événement réflexif* se produisant dans l'ordre du savoir. Il s'agirait d'une nouvelle manière de saisir notre héritage historique, agissant comme prise de conscience ouvrant l'horizon politique d'une réponse à la crise géologique<sup>3</sup>.

1 - Thomas C. Chamberlin et Rollin D. Salisbury, *Introductory geology : A textbook for colleges* (New York : H. Holt and Company, 1914), 682.

2 - On pourra se référer aux cartographies socio-conceptuelles suivantes : Jamie Lorimer, *The Anthro-po-scene : A guide for the perplexed*, *Social studies of science*, 47/1 (2017), 117-142; T. Toivanen, K. Lummaa *et al.*, *The many Anthropocenes : A trans-disciplinary challenge for the Anthropocene research*, *The Anthropocene review*, 4/3 (2017), 183-198. D'une certaine manière, l'engouement suscité par la notion d'Anthropocène dit tout le crédit conféré au diagnostic qu'elle énonce, à tel point qu'il existe très peu de catégories historiques conjuguant à la fois une telle portée épistémique (renommer au minimum l'histoire de l'industrialisation sous un même terme tout en désignant un événement dans l'histoire de l'humanité sans précédent) et une adhésion aussi large et rapide quant à sa thèse fondamentale (les activités humaines sont telles que les cadres connus de l'expérience collective en seront bouleversés).

3 - Dipesh Chakrabarty et Bruno Latour sont les deux grandes figures intellectuelles ayant défendu ce point de vue, notamment dans Dipesh Chakrabarty, *The climate of history : Four theses*, *Critical inquiry*, 35/2 (2009), 197-222; Dipesh Chakrabarty, *The Climate of history in a planetary age* (Chicago : The Univ. of Chicago Press, 2021); Bruno Latour, *Face à Gaïa : Huit conférences sur le nouveau régime climatique* (Paris, La Découverte : 2015).

Cependant, cette manière de problématiser l'émergence de la notion d'Anthropocène présuppose que les sociétés modernes n'ont guère thématiqué leur agir géologique, ou seulement à la marge. En effet, l'émergence de la notion d'Anthropocène ne peut constituer un événement réflexif qu'à partir du moment où l'on tient pour acquise la thèse selon laquelle la modernité aurait séparé le temps humain et le temps géologique, et, *in fine*, que l'humanité n'ait jamais été investie comme un agent géologique, notamment sur le plan scientifique. Mais, pourrait-on se demander : dans quelle mesure exacte cette thèse est-elle fidèle à l'histoire des énoncés scientifiques ? L'événement réflexif de l'Anthropocène constitue-t-il véritablement une révélation sur l'agentivité géologique de l'humanité ? Avons-nous toujours été géologiquement non-réflexifs ?

Cet article se donne pour tâche d'examiner empiriquement ces questions dans le cadre de la géologie naissante comme discipline scientifique au XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> siècle. Nous nous intéresserons à la manière dont elle a pu thématiquer l'agentivité géologique humaine et caractériser ainsi l'humanité comme un agent proprement géologique et s'inscrivant dans l'histoire de la Terre. Il va sans dire que la réflexivité environnementale, même globale, existe déjà bien avant cette période, sous diverses formes<sup>4</sup>. Cependant, il existe très peu d'analyses précises des discours sur l'activité géologique humaine autour de cette période, en dehors de quelques évocations de précurseurs<sup>5</sup>, concept dont on sait combien il faut se méfier au moins

4 - Ainsi que l'ont par exemple magistralement montré Jean-Baptiste Fressoz et Fabien Locher, *Les Révoltes du ciel : Une histoire du changement climatique (XV<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècle)* (Paris : Seuil, 2020).

5 - Notamment dans la littérature promouvant le concept d'Anthropocène dans les sciences de la Terre, voir par exemple Paul J. Crutzen et Eugene F. Stoermer, The « Anthropocene », *IGBP newsletter*, 41 (2000), 17-18 ; Will Steffen, Jacques Grinevald, Paul Crutzen, et John McNeill, The Anthropocene : Conceptual and historical perspectives, *Philosophical transactions of the Royal Society A : Mathematical, physical and engineering sciences*, 369 (2011), 842-867 ; Jan Zalasiewicz, Mark Williams et al., Stratigraphy of the Anthropocene, *Philosophical transactions of the Royal Society A : Mathematical, physical and engineering sciences*, 369 (2011), 1036-1055.

depuis Alexandre Koyré et Georges Canguilhem<sup>6</sup>. D'autre part, il nous semble que les travaux mentionnant ces histoires ne se sont pas suffisamment arrêtés à la fois sur le contexte interne d'énonciation et sur les différentes catégories qui pouvaient s'y rapporter<sup>7</sup>. Le but de cet article est de contribuer à combler ce manque en examinant notamment les définitions des ultimes séquences temporelles de l'histoire de la Terre et leur lien avec l'humanité. Nous montrerons en quoi elles participent de l'histoire longue de la géologie et ne possèdent en rien le caractère visionnaire ou minoritaire qu'on serait susceptible de leur attribuer. Analysant tout d'abord comment les définitions du temps géologique ont donné lieu à plusieurs manières d'ancrer ontologiquement un temps humain dans le temps géologique, nous verrons ensuite comment l'activité humaine sur le globe a ensuite été pensée à travers ses manifestations concrètes. Enfin, nous verrons comment les catégories d'Holocène et de Quaternaire – respectivement la période et l'ère géologique les plus récentes et sanctionnées par la Commission internationale de stratigraphie – ont incorporé la question humaine dans leur processus de formalisation et dans leurs usages au tournant du XIX<sup>e</sup> siècle et après. Au terme de notre parcours, il s'avère que le thème de l'action humaine fait partie des principaux *topoi* de la géologie moderne naissante et qu'il existe bien une réflexivité géologique sur le temps long dans l'histoire des sciences de la Terre.

6 - Georges Canguilhem, L'objet de l'histoire des sciences, in *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, 4<sup>e</sup> éd. (Paris : Vrin, 1979), 11. Ce thème de l'incommensurabilité des systèmes d'explication du monde n'est pas seulement une idée canguilhémienne, mais se retrouve dans d'autres traditions, dont Thomas Kuhn dans Thomas S. Kuhn, *The Structure of scientific revolutions*, 2<sup>e</sup> éd. (The University of Chicago Press, 1970). À ce propos, plusieurs critiques des soi-disant « précurseurs » de l'Anthropocène existent déjà, voir Clive Hamilton et Jacques Grinevald, Was the Anthropocene anticipated? *The Anthropocene review*, 2/1, (2015), 59-72; Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fressoz, *L'Événement Anthropocène : La Terre, l'histoire et nous* (Paris : Seuil, 2013); Alexander Federau, « Philosophie de l'Anthropocène : Interprétations et épistémologie », thèse de doctorat (univ. de Lausanne et univ. de Bourgogne, 2016); Bertrand Guillaume, Vernadsky's philosophical legacy : A perspective from the Anthropocene, *The Anthropocene review*, 1/2 (2014), 137-146.

7 - Voir par exemple : Alexander Federau, *Pour une philosophie de l'Anthropocène* (Paris : Puf, 2017); Peter H. Hansen, *The Summits of modern man : Mountaineering after the Enlightenment* (Cambridge : Harvard University Press, 2013); Robert Davis, Inventing the present : Historical roots of the Anthropocene, *Earth sciences history*, 30/1 (2011), 63-84.



## L'humanité dans l'histoire de la Terre : une possibilité conceptuelle déjà présente

Originellement construite à partir de méthodes d'historiens et de documents écrits (textes anciens, Bible), l'histoire de la Terre a peu à peu incorporé des éléments matériels dans son corpus de preuves, comme autant de « monuments » et d'« antiquités naturelles ». L'histoire naturelle de Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon<sup>8</sup> (1707-1788), est considérée comme un marqueur de l'achèvement de ce processus où l'histoire de la Terre délaisse les traces et les récits humains ou réputés divins pour donner la primauté aux « archives naturelles » et aux théories physiques<sup>9</sup>. Dans *Les Époques de la nature*, on trouve une histoire de la Terre divisée en sept « époques », la dernière étant celle de l'humanité. Buffon y avance l'idée selon laquelle l'« intelligence », « plus grand caractère de [la] puissance [de l'humanité] sur la nature », a « changé la face de la Terre, converti les déserts en guérets et les bruyères en épis<sup>10</sup>. » C'est par la transformation des plantes et des animaux qu'une telle conquête est rendue possible, mais aussi par le défrichement qui permet de ralentir, voire de stopper, le lent et inexorable refroidissement de la Terre<sup>11</sup>. Si l'idée d'un déluge géologiquement probant commence à refluer à partir des années 1830, la conception selon laquelle l'histoire naturelle suit une loi de développement divine n'était pas rare jusqu'à la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>12</sup>. Cependant, en dépit du parallèle entre la Genèse et les sept époques de Buffon, l'inspiration divine ne conditionne pas à elle seule l'existence d'une époque humaine dans l'histoire du globe pour l'histoire de la géologie en général.

La définition de l'époque la plus récente dans l'histoire de la

8 - Buffon fait partie des « précurseurs » de l'Anthropocène les plus fréquemment cités, à tel point qu'en 2018, une édition des *Époques de la nature* en langue anglaise est parue, préfacée par quatre acteurs proches de l'effervescence qui accompagne la notion d'Anthropocène : Jan Zalasiewicz, Sverker Sörlin, Libby Robin, et Jacques Grinevald. Voir Buffon, *The Epochs of nature*, trad. Jan Zalasiewicz, Mateusz Zalasiewicz et Anne-Sophie Milon (Chicago : The Univ. of Chicago Press, 2018).

9 - Rhoda Rappaport, *When geologists were historians, 1665-1750* (Ithaca : Cornell Univ. Press, 1997).

10 - Buffon, *Les Époques de la nature* (Paris : Imprimerie royale, 1780), 190-203.

11 - Buffon, *op. cit.* in n. 10, 190.

12 - Bernard Balan, *L'Évolution des idées en géologie : Des cosmogonies à la physique du globe* (Paris : Vrin, 2011).

Terre est associée dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle non pas nécessairement à l'activité matérielle de l'humanité ou d'une partie de celle-ci, mais à son avènement dans l'histoire du monde. Dans son manuel de géologie, Charles Lyell (1797-1875) emploie le terme *Recent* afin de désigner la période géologiquement actuelle ou « période humaine », même s'il caractérise cette période sans recours à un indice géologique d'origine humaine mais par la présence d'espèces de coquillages non-éteintes dans les dépôts de cette période<sup>13</sup>. Ainsi, dans cette définition, le terme *Recent* renvoie conceptuellement non pas à une influence géologique d'origine humaine, mais à une caractérisation par une simple présence temporelle de l'humanité dans l'histoire de la Terre. Néanmoins, une telle présence n'est ni fortuite ni le reflet d'une convention arbitraire.

Au premier abord, on pourrait estimer que Lyell n'attribue pas d'importance géologique à l'humanité. En effet, nonobstant les modifications biologiques par la sélection artificielle des espèces et l'action climatique humaine due au défrichement, qu'il remarque, l'humanité ne possède guère, chez Lyell, une influence géologique au sens matériel du terme. Ainsi, par exemple, dans le chapitre XII du deuxième volume de ses *Principles of geology*, le géologue estime que :

« [...] la force totale exercée par l'homme est réellement insignifiante comparée aux opérations des grandes causes physiques à l'œuvre [...] dans le monde inanimé. Si toutes les nations de la Terre essayaient de déplacer la lave qui s'est écoulée lors de l'éruption des volcans islandais en 1783 et durant les deux années suivantes, et si elles essayaient de l'enfourer dans les plus profonds abîmes de l'océan, [elles] devraient travailler d'arrache-pied durant des millénaires avant que leur tâche ne fût accomplie. Pourtant, la matière charriée une seule année par le Gange et le Brahmapoutre est probablement supérieure, en masse et en volume, à la quantité de lave islandaise produite

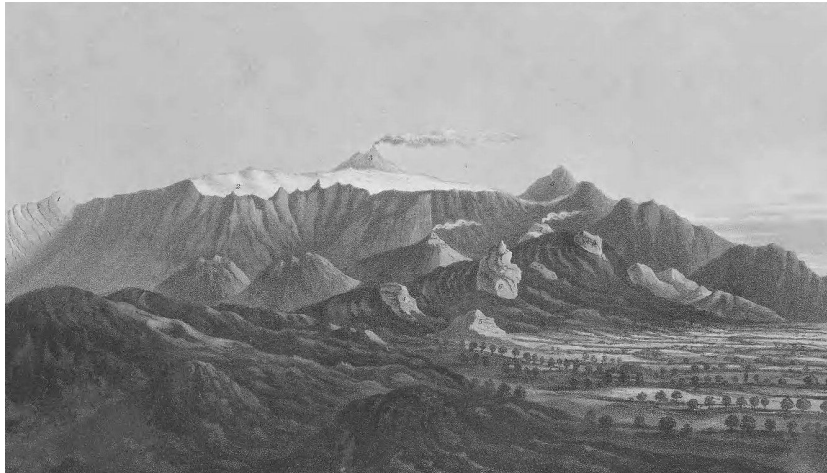
13 - Charles Lyell, *A manual of elementary geology*, 4<sup>e</sup> éd. (Londres : John Murray, 1852 [1838]), 166-117. Notre traduction. Dans la suite du texte, nous traduisons, sauf mention du contraire.

par cette grande éruption<sup>14</sup>. »

Que l'action matérielle de l'humanité soit ainsi négligeable par rapport aux autres forces de la nature doit être compris dans le cadre des thèses de Lyell sur la causalité géologique. Non seulement toutes les causes géologiques du passé doivent être inférées à partir des causes contemporaines, mais il existe aussi un équilibre global dans lequel les changements, toujours progressifs, qui s'effectuent dans un lieu sont compensés par d'autres changements graduels en un autre lieu de la Terre ou un autre temps. Cependant, le statut de l'humanité dans l'histoire de la Terre n'est pas pour autant indifférent à Lyell. Mais alors comment qualifier la position ontologique de l'humanité dans ce cadre ? Doit-elle se comprendre comme une cause physique à l'instar des autres vivants ou les agentivités inorganiques, ou bien doit-on lui reconnaître une originalité absolue par rapport au reste de la création ? Si tel était le cas, quel sens lui reconnaître dans l'histoire de la Terre ?

Dans le chapitre ix du premier volume des *Principles*, Lyell remarque que l'humanité relève d'une « agentivité singulière et sans précédent » (*peculiar and unprecedented agency*) dans l'histoire la Terre, ne serait-ce qu'au regard de la « preuve géologique » (*geological evidence*) de l'influence humaine sur les autres espèces. Celle-ci s'exerce à la fois sur leurs « instincts », leur « distribution géographique », leur « nombre relatif », tout ceci à « un degré supérieur » et d'une manière très différente par rapport à la façon dont les autres espèces interagissent entre elles. En outre, selon Lyell, l'espèce humaine « diffère plus d'elle-même en termes de puissance entre deux moments éloignés de son histoire que n'importe quelle autre espèce de l'ordre supérieur des

14 - « But the aggregate force exerted by man is truly insignificant, when we consider the operations of the great physical causes, whether aqueous or igneous, in the inanimate world. If all the nations of the earth should attempt to quarry away the lava which flowed during one eruption from the Icelandic volcanoes in 1783 and the two following years, and should attempt to consign it to the deepest abysses of the ocean, wherein it might approach most nearly to the profundities from which it rose in the volcanic vent, they might toil for thousands of years before their task was accomplished. Yet the matter borne down by the Ganges and Burrampooter, in a single year, probably exceeds, in weight and volume, the mass of Icelandic lava produced by that great eruption. » Charles Lyell, *Principles of geology : Being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation* (Londres : John Murray, 1830-1833), vol. 2, 207-208.



**Figure 1**

Frontispice de la 1<sup>re</sup> éd. du volume 2 des *Principles of geology* de Lyell, représentant la vallée du mont Etna. En figurant la coexistence d'un volcan actif, de monts rocheux dénudés et d'une vallée sur laquelle la vie s'épanouit, l'image nous donne à contempler les puissances relatives dans l'ordre des causes terrestres. Les massifs rocheux occupent un espace considérable en regard de la zone d'habitabilité du vivant, mais les traits rectilignes dessinés par la végétation dénotent la main humaine. Source : Lyell, op. cit. in n. 14, vol. 2.

animaux ne diffère d'une autre<sup>15</sup>. » Donc la nouveauté est moins relative à un déplacement de matière qu'à la *forme* des modifications à l'œuvre ainsi qu'à leur *dynamique* très rapide. Pour Lyell, ce fait est très neuf dans l'histoire de la Terre par rapport à la durée d'existence des autres espèces, si bien qu'elle remet en question l'impassible et sempiternelle régularité du temps géologique : un « philosophe » ne pourrait guère « spéculer avec confiance au sujet de futures éventualités<sup>16</sup> ». Lyell se propose alors de se placer du point de vue d'un « être intelligent » (*intelligent being*) non humain, observant cette irrégularité géologique : que devrait-il en déduire ? Non pas « qu'aucune des lois stables et constantes du monde animé ou inanimé n'a été subvertie par l'agentivité humaine », mais bien que « les modifications

15 - Lyell écrit : « *The progressive movement of each successive generation of men causes the human species to differ more from itself in power at two distant periods, than any one species of the higher order of animals differs from another.* » Lyell, op. cit. in n. 14, vol. 1, 163.

16 - Lyell, op. cit. in n. 14.

produites étaient dues à des circonstances nouvelles et extraordinaires, et que celles-ci n'étaient point de nature physique mais morale<sup>17</sup> ». Lyell semble ainsi faire de l'humanité une exception ontologique à tout son système, qui suppose une asymétrie entre passé et futur qu'il assume totalement :

« Or, s'il est raisonnable de tirer de telles inférences quant à l'avenir, nous ne pouvons qu'appliquer les mêmes règles d'induction au passé. On ne contestera guère que nous n'avons pas le droit de projeter dans le futur des changements dans les effets des causes existantes qui ne soient pas conformes au principe d'analogie, à moins qu'ils ne soient produits par le développement progressif de la puissance humaine (*human power*), ou peut-être par quelque autre relation nouvelle entre le monde moral et le monde matériel. De même, nous devons admettre que, lorsque nous spéculons sur les vicissitudes de la création animée et inanimée dans les âges du passé, nous n'avons aucune raison de nous attendre à des effets anormaux, à moins que l'homme ne soit intervenu, ou que des indications claires de quelque autre source morale (*moral source*) de perturbation temporaire n'apparaissent<sup>18</sup>. »

Par conséquent, il y a chez lui à la fois une quasi-indifférence matérielle de la Terre à l'égard de l'humanité et un événement géologique constitué par la singularité humaine que Lyell n'attribue pas à un dieu. En outre, l'événement humain n'est pas appelé à perdurer, ou, plus exactement, la durée de l'existence humaine sur le globe ne constitue point un critère pour asseoir l'importance géologique de l'agent moral. C'est presque le contraire dans la mesure où Lyell insiste sur le fait que l'action physique et l'existence morale sont bien appelées à disparaître, et qu'alors

17 - Lyell, *op. cit.* in n. 14, 164. Nous devons à un article de Robert Davis la découverte de ce passage qu'il cite. Cependant, nous le lisons et l'analysons ici différemment. Voir Davis, *op. cit.* in n. 7, 72-73.

18 - « Now, if it would be reasonable to draw such inferences with respect to the future, we cannot but apply the same rules of induction to the past. It will scarcely be disputed that we have no right to anticipate any modifications in the results of existing causes in time to come, which are not conformable to analogy, unless they be produced by the progressive development of human power, or perhaps from some other new relations between the moral and material worlds. In the same manner we must concede, that when we speculate on the vicissitudes of the animate and inanimate creation in former ages, we have no ground for expecting any anomalous results, unless where man has interfered, or unless clear indications appear of some other moral source of temporary derangement. » Lyell, *op. cit.* in n. 14, vol. 1, 164.

l'histoire de la Terre reprendra son cours normal<sup>19</sup>. À la fin de sa vie, plus de quarante ans après la première édition des *Principles*, Lyell maintient et affirme sa position sur la possibilité de modifications matérielles importantes sur le globe, avec cependant une légère inflexion : en effet, sans doute sous l'influence darwinienne, il reconnaît alors « la possibilité d'une loi d'évolution et de progrès » dans la vie même, ce qui rend en retour le monde moral capable, en principe et non encore actuellement, de se mesurer aux forces du globe en tant qu'il relève aussi d'une causalité physique<sup>20</sup>.

Cependant, c'est véritablement à partir de la seconde moitié du xix<sup>e</sup> qu'apparaissent les occurrences de termes se rapportant explicitement à l'humanité comme agent géologique. Souvent attribué à l'abbé Antonio Stoppani (1824-1891), que nous croiserons plus avant, le terme « Anthropozoïque » (*Anthropozoïc*) n'est toutefois pas de son invention. Il est mentionné par le théologien britannique Thomas W. Jenkyn (1794-1858) dans des écrits de vulgarisation deux décennies auparavant. Publiés dans la revue *The Popular educator*, ces textes prennent part à une entreprise de vulgarisation encyclopédique dans un format hebdomadaire et bon marché, atteignant 100 000 abonnements et regroupant la plupart des disciplines savantes et techniques<sup>21</sup>. Tous les thèmes y sont déjà présents : modification du climat, transport et modification des plantes et des animaux (par sélection), extermination des grands prédateurs, agriculture, déplacement de matière inorganique, etc<sup>22</sup>. Pour

19 - Lyell, *op. cit.* in n. 14, vol. 1, 163-164 ; vol. 2, 206-207.

20 - Voir à ce sujet la 12<sup>e</sup> éd. des *Principles of geology*. Curieusement Lyell a retiré son expérience de pensée et n'interprète plus le monde moral comme étant seulement en lui-même un événement géologique, mais précise que l'action matérielle s'y rapportant peut le devenir – quoique cette action soit dans ses traits généraux plus proche de celles d'autres espèces que couramment imaginé. Charles Lyell, *Principles of geology : Or, the modern changes of the Earth and its inhabitants, considered as illustrative of geology*, vol. 1, 12<sup>e</sup> éd. (Londres : John Murray, 1875), 169-171.

21 - Cassell & Company, *The Story of the house of Cassell* (Londres : Cassell & Company, 1922).

22 - Thomas W. Jenkyn, *Lessons in geology* XLVI. Chapter IV ; On the effect of organic agents on the Earth's crust, in *The Popular educator : A complete encyclopaedia of elementary, advanced and technical education*, vol. 4 (Londres : Cassell, Petter and Galpin, 1854), 140. Il ne faut pas perdre de vue l'importance de la religion chrétienne pour cet auteur : tout est présenté sous le patronage des écritures et du *supreme and benevolent architect* (*ibid.*, 141).

Jenkyn, l'action humaine est trop récente pour avoir exercé une influence décisive du point de vue géologique. En revanche, ce dernier ajoute que « [...] partout où l'humanité s'est installée et a promu la civilisation, il s'est produit de grands changements géologiques à la surface du globe<sup>23</sup>. »

Ainsi, dans sa classification, Jenkyn ne propose pas d'intégrer l'Anthropozoïque dans celle de Lyell, relevant la tension entre importance conceptuelle et difficulté pratique de mise en œuvre :

« Toutes les roches récentes, nommées dans notre dernière leçon post-Pléistocène, auraient pu être appelées anthropozoïques, c'est-à-dire des roches correspondant à l'existence de l'humanité, sauf que leur division inférieure contient des fossiles de toutes les espèces de coquillages existant, sans aucun reste ni trace de la race humaine<sup>24</sup>. »

C'est pourquoi l'Anthropozoïque n'est pas intégré dans la classification que Jenkyn reprend de Lyell (fig. 2). À ce stade, il convient toutefois de souligner que l'Anthropozoïque est défini comme une unité temporelle à cheval entre les modifications géologiques actuelles d'un processus de « civilisation » et celles qui sont anticipées dans le futur, dans la mesure où c'est dans le devenir même de ce processus qu'est contenu l'agent majeur de la transformation géologique.

Le professeur de géologie au Yale College, président de la Société américaine de géologie au début des années 1890, James Dwight Dana (1813-1895) propose lui aussi, dans son *Manual of geology* publié en 1863, une idée équivalente : l'« Ère de l'esprit » (*Age of Spirit*) ou « Âge de l'homme » (*Age of Man*). Contrairement à Jenkyn et Lyell, la nouvelle unité temporelle est positionnée au même niveau hiérarchique que les autres : Silurien, Dé-

23 - Jenkyn, *op. cit.* in n. 22, 139.

24 - « All the recent rocks, called in our last lesson Post Pleistocene, might have been called Anthropozoic, that is, human-life rocks, but for the fact that their lower division contains fossils of all the existing species of shells, without any remains or traces of the human race. » Thomas W. Jenkyn, *Lessons in geology* L. Chapter V; On the classification of the rocks, in *The Popular educator : A complete encyclopaedia of elementary, advanced and technical education*, vol. 4 (Londres : Cassell, Petter and Galpin, 1854), 313.

A TABULAR VIEW OF ROCKS IN THE VERTICAL ORDER IN WHICH THEY OCCUR.

I. THE SYSTEM OF MODERN ROCKS.		
Names of Groups according to LYELL.	LITHOLOGICAL CHARACTER.	British Localities—where found.
1. Recent.	<div style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <p>The deposits of present rivers, consisting of sand, mud, and silt; banks formed in the sea, at the mouths of rivers; peat mosses, shelly marl; banks of shingle thrown up by the sea; coral reefs, &amp;c.; sand dunes thrown up by winds.</p> <p>The clays, marls, and volcanic tufas of the Isle of Ischia, in Italy.</p> <p>The Löss, or the ancient sediment of the Rhine.</p> <p>The newer parts of the boulder formation, with erratic blocks.</p> </div>	<div style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <p>Banks of streams; bottom of lakes and rivers; the Goodwin sands; the dunes of Cornwall, Lancashire, and Norfolk.</p> <p>Scotland, and the North of England,</p> </div>
2. Post-Pleistocene.		

**Figure 2**

Extrait de la classification exposée par Jenkyn. Source : Thomas W. Jenkyn, *Lessons in geology XLVII. Chapter V; On the classification of the rocks in the Earth's crust*, in *The Popular educator : A complete encyclopaedia of elementary, advanced and technical education*, vol. 4 (Londres : Cassell, Petter and Galpin, 1854), 165.

vonien, Reptilien, etc<sup>25</sup>. Dana relève explicitement l'importance des grands moments de l'histoire de la vie pour justifier ce séquençement :

« Alors que l'histoire inorganique se poursuivait [...], il y eut, finalement, l'introduction de la vie – une nouvelle et grande marche du progrès. Cette vie [...] s'accroissait et s'élevait à travers la création de nouveaux types, jusqu'à ce que l'histoire aboutisse à l'apparition de l'homme. Dans cette histoire organique, il existe des phases successives de progrès, ou encore des séries de points culminants, et la création de l'homme et de l'esprit constitue le dernier et le plus éminent de ces apogées<sup>26</sup>. »

Dana insiste bien sur le fait que c'est uniquement par l'évolution du vivant que l'on peut juger d'une telle histoire; l'apparition de l'humanité introduit donc une discontinuité au sein de la vie<sup>27</sup>.

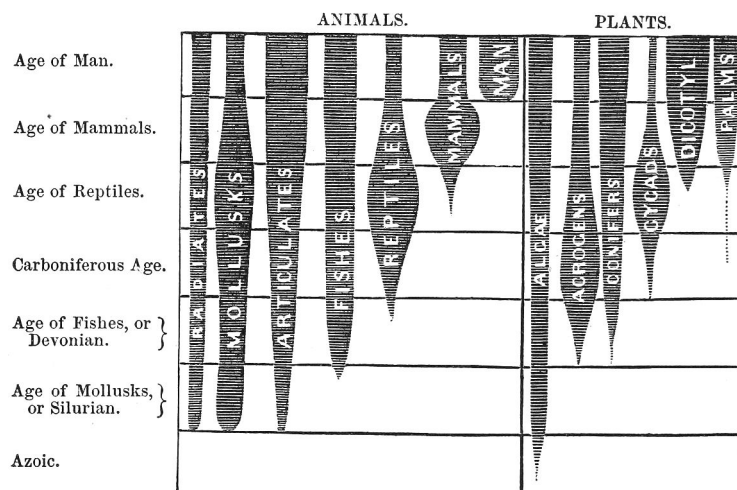
Par conséquent, l'humanité n'est plus un mammifère à proprement parler, et cela se traduit du point de vue morphologique

25 - James D. Dana, *Manual of geology, treating of the principles of the science, with special reference to American geological history, for the use of colleges, academies, and schools of science* (Philadelphie et Londres : T. Bliss & Co., 1863), 116.

26 - « While the inorganic history was still going on (although finished in its more fundamental ideas), there was, finally, the introduction of life, – a new and great step of progress. That life, beginning with the lower grades of species, was expanded and elevated through the creations of new types, until the history closed in the appearance of Man. In this organic history there are successive phases of progress, or a series of culminations, with the creation of Man and Mind as the last and loftiest of these culminations. » Dana, *op. cit.* in n. 25, 126.

27 - Dana, *op. cit.* in n. 25, 127.



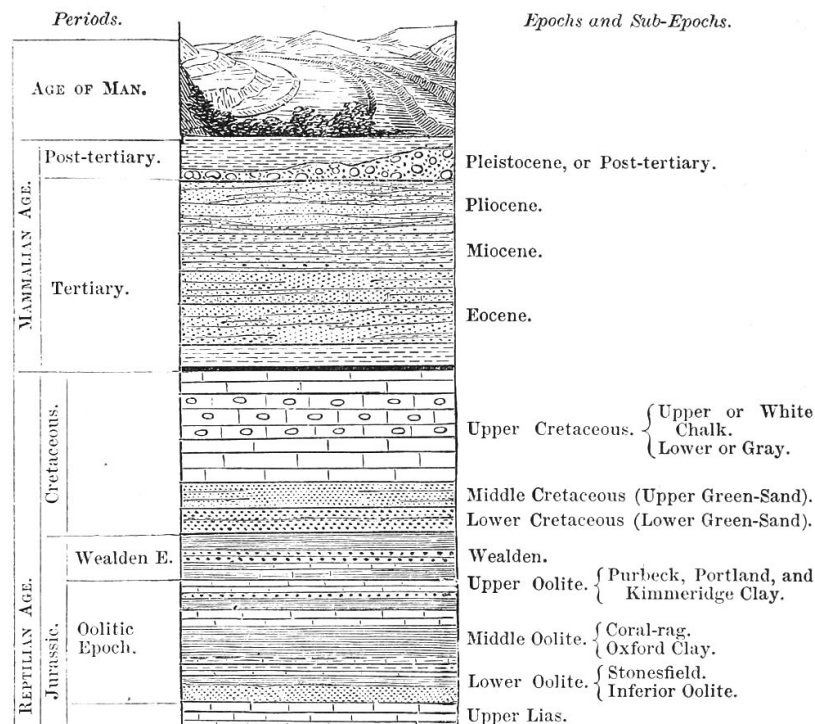


**Figure 3**  
Représentation des âges de la Terre en coïncidence avec l'apparition des grandes étapes de l'évolution de la vie selon Dana. L'auteur revendique une inspiration d'après les travaux du géologue suisse Agassiz. Source : Dana, op. cit. in n. 25, 128.

puisque le développement du cerveau est selon Dana l'élément introduisant une différence ontologique mise en rapport au développement des savoirs, des techniques, des valeurs et de la spiritualité<sup>28</sup>. Si Dana expose toutes les roches et les caractères de l'évolution propres à l'« Âge de l'homme », c'est uniquement dans la mesure où ces éléments se forment au cours de cet âge ; en rien elles ne sont formées par l'action humaine, même s'il relève que l'action humaine a pu entraîner la disparition de plusieurs espèces (dodo, auroch, etc.). En somme, il s'agit ici de décrire une formation, une fois la spécificité de celle-ci déjà justifiée du point de vue de l'histoire de la vie<sup>29</sup>. Il est à noter que Dana publie plusieurs articles décrivant le phénomène de céphalisation, processus évolutif au cours duquel le système nerveux des animaux se centralise et se perfectionne, allant des crustacés aux humains en passant par les mollusques. Cette thèse, considérée plus tard par Vladimir Verdnasky comme fondamentale, aura également une influence sur Pierre Teilhard de Chardin au

28 - Dana, op. cit. in n. 25, 573-574.

29 - Dana, op. cit. in n. 25, 574-589.



**Figure 4**

Représentation des dernières strates de la croûte terrestre en fonction des périodes selon Dana. Source : Dana, op. cit. in n. 25, 132.

xx<sup>e</sup> siècle<sup>30</sup>.

L'Anthropozoïque est également proposée par le professeur de géologie à l'université de Dublin, Samuel Haughton (1821-1897).

30 - James D. Dana, The Classification of animals based on the principle of cephalisation, *American journal of science*, 36/108 (1863), 321-352. Vernadsky et Teilhard de Chardin sont deux adeptes connus du concept de « noosphère ». Le premier se réfère directement à Dana et à la céphalisation comme processus évolutif déterminant : Vladimir Vernadsky, The biosphere and the noosphere, *American scientist*, 33/1 (1945), 1-12. Teilhard, qui nomme également ce processus « cérébration », y voit tout comme Vernadsky un phénomène continu dans la vie mais aussi un symptôme évolutif du passage progressif de la biosphère à la noosphère, permis par l'émergence du genre humain, dont le statut serait exceptionnel dans l'univers. Voir par exemple Pierre Teilhard de Chardin, *La Place de l'homme dans la nature : Le groupe zoologique humain* (Paris : Union générale d'éditions, 1962); Pierre Teilhard de Chardin, *Le Phénomène humain* (Paris : Seuil, 1955).

Également révérend, il a été *fellow* au prestigieux Trinity College. En 1865, il publie un manuel de géologie qu'il présente dans sa préface comme une « introduction aux traités plus systématiques de Lyell, Dana, Jukes et d'autres<sup>31</sup> ». Sans revenir en détail sur son contenu, précisons toutefois que le manuel se présente comme une somme des connaissances et des débats en cours, allant de la formation du globe aux techniques de datation en passant par l'exposition des thèses importantes de la discipline et bien entendu par la chronologie.

Haughton reprend explicitement les cinq âges de Dana mais il y substitue sa propre terminologie des « époques » : Malazoïque, Ichyozoïque, Saurozoïque, Mastozoïque et enfin Anthropozoïque (*Anthropozoic*). Comme chez Dana, chaque époque correspond à une classe de vivant<sup>32</sup>. Selon lui, la dernière époque est justifiée par le fait que « [...] le travail conjoint des archéologues et des géologues tend à prouver que la fin du règne des mammifères sur le globe a été principalement provoquée par la création de la race humaine (*the creation of the race of Man*), qui est dotée de facultés lui permettant de détruire aisément toutes les races rivales, mêmes celles qui lui sont supérieures en taille et en force brutes<sup>33</sup> ». Haughton est sans doute celui qui, parmi tous les profils mentionnés, est le plus rétif au cadre évolutionniste naissant à son époque : l'humanité n'est pas d'origine animale mais bien « le produit direct du pouvoir créatif de Dieu (*creative power of God*), et elle gouverne sur les autres créatures par Son décret immédiat<sup>34</sup> (*His express decree*) ».

Il apparaît que l'insertion de l'humanité comme événement de l'histoire de la Terre est conçue d'abord au niveau ontologique. En effet, même si l'activité matérielle de l'humanité sur le globe est analysée, elle ne constitue pas la justification première d'un âge géologique humain. Bien plutôt, c'est à partir d'un fond philosophique justifiant l'exceptionnalité humaine par rapport au

31 - Samuel Haughton, *Manual of geology* (Londres : Longman, Green, Roberts, & Green, 1865), v.

32 - Haughton, *op. cit.* in n. 31, 138.

33 - « [...] and the concurrent labours of archaeologists and of geologists tend to prove that the termination of the reign of Mammals on the globe was mainly due to the creation of the race of Man, who is endowed with faculties which enable him to destroy with ease all rival races, however superior to him in the brute qualities of size and strength. » Haughton, *op. cit.* in n. 31, 344.

34 - Haughton, *op. cit.* in n. 31, 344.

reste des êtres terrestres qu'est envisagé l'événement humain dans l'histoire de la Terre. Cependant, comme nous allons le voir, il ne s'agit pas du seul mode de justification.

### **L'activité géologique de l'humanité : une emprise matérielle de plus en plus visible**

Comme nous l'avons auparavant mentionné, l'unité du temps géologique attribuée à l'activité humaine par l'abbé Stoppani lui a souvent valu d'être mentionné comme précurseur par les articles sur la notion d'Anthropocène dans les publications contemporaines. Stoppani propose au début des années 1870 la notion d'âge Anthropozoïque dans son *Corso de geologia*, mais il est cité par George Perkins Marsh (1801-1882) dans le dernier chapitre de *The Earth as modified by human action*<sup>35</sup>, et c'est cette dernière citation qui s'est transmise dans les ouvrages constituant aujourd'hui l'horizon de référence pour les promoteurs de la notion d'Anthropocène. Paul Crutzen cite ainsi l'ouvrage de William C. Clark et Robert E. Munn, *Sustainable development of the biosphere* (1986), dans lequel Stoppani est lui-même identifié via, précisément, une citation de Marsh<sup>36</sup>. En revanche, il n'y a guère retour aux textes originaux.

Dans le cadre des cours qu'il doit préparer à l'Institut technique supérieur de Milan, l'abbé Stoppani rédige des notes préparatoires qu'il va par la suite retravailler pour écrire son *Corso de geologia*. Dès ces notes de 1867, Stoppani affirme<sup>37</sup> l'existence d'une véritable « formation anthropozoïque » (*formazione antropozoica*<sup>38</sup>) qu'il associe à une époque « Néozoïque » (*Neozoica*). Stoppani se réclame du projet humboldtien d'approcher la nature de façon holistique, et critique la dualité de l'histoire et de la géologie, autant que la séparation des disciplines qui s'intéressent à la Terre (géologie, géographie, etc.). Le *Corso* s'organise

35 - George Perkins Marsh, *The Earth as modified by human action : A last revision of « Man and nature »* (New York : Charles Scribner's Sons, 1885).

36 - William C. Clark et Robert E. Munn, *Sustainable development of the biosphere* (Cambridge : Cambridge University Press, 1986), p. 12 et note 18 p. 43.

37 - Antonio Stoppani, *Note ad un corso annuale di geologia dettate per uso degli ingegneri allievi del Reale istituto tecnico superiore di Milano : Geologia stratigrafica* (Milan : Tipografia di Giuseppe Bernardoni, 1867), 167-182.

38 - Ensemble cohérent de strates associées à un temps géologique donné.

<p><b>Epoca neozoica.</b>  <b>Terreni postterziari.</b> (Quaternari.)  <b>ANTROPOZOICO.</b> (Recente.)  <i>Epoca storica.</i>              Età del ferro in Europa.  <i>Epoca preistorica.</i>              Età del bronzo.              2.<sup>a</sup> Età della pietra.              1.<sup>a</sup> Età della pietra.  <b>PLIOSTOCENE.</b> (Pliocene, nuovo pliocene, postterziario.)  <i>Glaciale.</i>              Epoca dei terrazzi.              Epoca del terreno erratico. (Epoca del drift.)</p>	<p><b>ERA NEOZOICA.</b>  <b>POSTERZIANO O QUATERNARIO.</b>              Periodo glaciale o del terreno erratico.              Periodo dei terrazzi.  <b>ERA ANTROPOZOICA.</b>  <b>EPOCA PREISTORICA.</b>              1.<sup>a</sup> Età della pietra, o periodo della pietra scheggiata (Epoca del Renna in Europa).              2.<sup>a</sup> Età della pietra, o periodo della pietra levigata (Epoca degli animali domestici in Europa).              Età del bronzo.  <b>EPOCA STORICA.</b>              Età del ferro.</p>
--	--

Figure 5

Périodisations proposées par Stoppani relatives à l'Anthropozoïque. A gauche, il s'agit de celle des Note, à droite celle du Corso. On peut constater un changement dans la hiérarchie des temps géologiques. Sources : Stoppani (1867), op. cit. in n. 38, 161; Antonio Stoppani, Corso di geologia : Geologia stratigrafica, vol. 2 (Milan : G. Bernardoni et G. Brigola, 1873), 163.

en trois volumes : les deux premiers, traitant respectivement du fonctionnement de la Terre et de son histoire, correspondent selon lui à la science séculière ; le troisième volume traite quant à lui de ce qu'il appelle « géologie endogénique » (*geologia endografica*), qui est en fait l'interprétation qu'on peut donner des éléments séculiers dans leur rapport aux Écritures, c'est-à-dire, au fond, une re-christianisation de la première partie.

C'est dans le second volume que Stoppani présente l'Anthropozoïque (*Antropozoico*). Faisant le bilan de la minéralogie de son époque, il décrit la genèse des roches et des sédiments et fournit des éléments de stratigraphie et de paléontologie. À l'intérieur de la section sur la stratigraphie chronologique, l'Anthropozoïque est inséré au sein de l'histoire de la Terre : si dans les *Note* celui-ci apparaît comme une période de l'époque du Néozoïque, le *Corso* attribue à l'apparition de l'humanité sa propre époque (fig. 5). Comme d'autres, Stoppani considère que l'apparition de l'humanité à la surface du globe est un élément radicalement nouveau, mais cette nouveauté n'est pas seulement d'ordre morale, spirituelle ou principielle :

« La création de l'homme correspond à l'introduction d'un nouvel élément dans la nature, d'une force totalement inconnue des mondes anciens. Et laissez-moi préciser que je parle bien des mondes physiques, puisque la géologie est l'histoire de la planète et non du monde intellectuel et moral. [...] Cette créature est véritablement un nouvel élément pour le monde physique : c'est une nouvelle force tellurique qui, par sa puissance et son

universalité, ne pâlit pas face aux principales forces du globe<sup>39</sup>. »

Stoppani fait débiter l'apparition de l'intellect, déterminante dans cette époque, aux origines de l'humanité préhistorique (Âge de pierre) et non pas à l'industrialisation. Contrairement à Lyell, l'influence de l'activité humaine s'étend sur de nombreux points : modification des sols, des rivières, des deltas, des forêts mais aussi sélection des animaux<sup>40</sup>. L'abbé imagine qu'un géologue du futur, qui viendrait après la disparition de l'humanité, ne pourrait pas ignorer l'importance de l'intelligence humaine dans l'histoire de la Terre<sup>41</sup>. Si Stoppani souligne l'importance future de l'Anthropozoïque<sup>42</sup>, il expose bien toutefois les éléments qui forment ce qu'aujourd'hui on pourrait nommer le stratotype de l'Anthropozoïque : glissements de terrains, dépôts lacustres et marins, inondations récentes, deltas, tourbe et dépôts combustibles, dépôts d'origine animale (comme le guano), dépôts des glaciers (moraines), dépôts volcaniques, dépôts marins et enfin fossiles<sup>43</sup>. Finalement, ces marqueurs ne contiennent pas explicitement d'artefact d'origine humaine ; ils renvoient aux processus de mémorisation de la Terre, capturant les œuvres humaines qui par elles-mêmes ne peuvent signer leur présence à travers les âges.

Ainsi, de même que pour Jenkyn, l'Anthropozoïque correspond à un événement géologique qui n'a pas encore révélé l'étendue de sa nature. En revanche, cela n'implique pas qu'une définition géologique soit impossible et que l'Anthropozoïque soit seulement justifié par un principe ontologique, constitué par l'originalité dans l'histoire de la Terre de l'avènement de l'humanité. Telle est précisément la différence entre Lyell et Stoppani : pour celui-ci, il est déjà possible d'associer action humaine et enregis-

39 - « *La creazione dell'uomo è l'introduzione di un element nuovo nella natura, di una forza affatto sconosciuta ai mondi antichi. E si badi bene che io parlo dei mondi fisici, poichè la geologia è la storia del pianeta, non già del mondo intellettuale e morale. Ma il nuovo essere, insediato sul vecchio pianeta, il nuovo essere che, non solo come gli antichi abitatori del globo, riunisce il mondo inorganico all'organico, ma, con connubio affatto nuovo e misterioso, la fisica natura sposa al principio intellettuale e morale; questa creatura veramente nuova in sè stessa, è anche pel mondo fisico un nuovo elemento: è una nuova forza tellurica, che, per la sua potenza c universalità, non sviene in faccia alle maggiori forze del globo.* » Stoppani, *op. cit.* in n. 38, 732.

40 - Stoppani, *op. cit.* in n. 38, 733-739.

41 - Stoppani, *op. cit.* in n. 38, 739-740.

42 - Stoppani, *op. cit.* in n. 38, 740.

43 - Stoppani, *op. cit.* in n. 38, 740-741.

trement rocheux.

Le regard de Ernst Haeckel (1834-1919) sur la possibilité d'une époque humaine est approximativement contemporain des travaux de Stoppani. Professeur de zoologie à l'université d'Iéna entre 1862 et 1909<sup>44</sup>, de renommée internationale, Haeckel est notamment connu aujourd'hui pour avoir forgé<sup>45</sup> le terme « écologie ». En 1868, il publie une somme de 24 conférences prononcées au cours de l'hiver 1867 à 1868, traduite en français sous le titre *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles*. Le livre connaît au moins 6 éditions dans la langue maternelle de l'auteur, dont la dernière est traduite en français en 1877 et deux en anglais en 1876 et 1914. Dans la quinzième leçon sur les périodes et archives de la création, Haeckel expose ainsi la cinquième division du temps géologique :

« La cinquième et dernière division de l'histoire organique terrestre forme l'âge quaternaire ou âge de la civilisation. Comparativement à la longueur des quatre autres âges, la durée de cette courte période, que nous appelons avec une outrecuidance comique "histoire universelle", est parfaitement insignifiante. Comme cet âge est caractérisé par le développement du genre humain et de sa civilisation, et que ce fait a métamorphosé le monde organique plus que toutes les influences antérieures, on peut appeler cet âge *âge de l'humanité*, âge anthropolithique ou âge anthropozoïque<sup>46</sup>. »

Haeckel reprend à son compte l'opinion commune de son temps, ou du moins des décennies au cours desquelles il prononce ses conférences. Comme on l'entrevoit dans cette citation,

44 - Il devient titulaire en 1865. Charles Martins, Introduction biographique, in Ernst Haeckel, *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles*, trad. Charles Letourneau et Charles Martins, 2<sup>e</sup> éd. (Paris : C. Reinwald et Cie, 1877), 1-xx; Jean-Paul Deléage, *Une histoire de l'écologie* (Paris : Seuil, 1994).

45 - Il y a eu débat pour trancher qui de lui ou de Thoreau en était l'auteur, mais il s'avère que la lecture des carnets de Thoreau l'a disqualifié à ce titre. Deléage, *op. cit.* in n. 44, 62-63.

46 - Haeckel, *op. cit.* in n. 44, 343. Nous utilisons la traduction française de 1877, mais l'édition originale (1868) contient également les termes ici exposés : *anthropolithische* et *anthropozoische*. Ernst Haeckel, *Natürliche Schöpfungsgeschichte. Gemeinverständliche wissenschaftliche Vorträge über die Entwicklungslehre im Allgemeinen und diejenige von Darwin, Goethe, und Lamarck im Besonderen, über die Anwendung derselben auf den Ursprung des Menschen und andere damit zusammenhängende Grundfragen des Naturwissenschaft* (Berlin : Reimer, 1868), 307. On pourra se référer aux propos explicatifs de l'auteur, *ibid.*, 300.

V. CINQUIÈME PÉRIODE : AGE ANTHROPOLITHIQUE. AGE QUATERNAIRE.

(Age des Hommes et des arbres cultivés.)

13. Age quaternaire ancien	ou	Période glaciaire.
14. Age quaternaire moyen	—	Période post-glaciaire.
15. Age quaternaire récent	—	Période de la civilisation.

**Figure 6**

Structure temporelle de l'âge anthropolithique chez Haeckel. Source : Haeckel (1877), op. cit. in n. 46, 344.

si l'« âge anthropozoïque » (*anthropozoische*) a une importance géologique, ce n'est pas simplement en vertu d'un principe anthropocentré arbitraire qui voudrait que, l'humanité étant la quintessence de la création, une unité de temps géologique lui soit affectée. Cette « création » n'a pas de sens théologique chez Haeckel. Athée convaincu, il défend une philosophie moniste dans laquelle la nature seule est source de vérité<sup>47</sup> :

« Plus que tout autre organisme, l'homme a transformé, détruit, bouleversé la population animale et végétale du globe. Pour cette raison, *et point du tout parce que nous assignons à l'homme une place privilégiée dans la nature*, nous sommes en droit de considérer le développement du genre humain et de sa civilisation comme le point de départ d'une période dernière et toute spéciale de l'histoire organique terrestre<sup>48</sup>. »

Comme certains de ses contemporains, Haeckel estime que l'humanité a peut-être existé avant cet âge, mais que c'est véritablement après le Miocène, lorsque « l'homme primitif sortit par évolution des singes anthropoïdes » que l'importance de l'action humaine s'est révélée; l'événement crucial pour Haeckel étant l'invention du langage, « l'instrument le plus utile au développement de l'intelligence humaine et l'établissement de la souveraineté de l'homme sur le reste des organismes<sup>49</sup>. »

Haeckel tient véritablement à « l'âge anthropolithique » (*anthropolithische*). Sans s'attarder sur la description de ses formations, il insiste lourdement sur le caractère éphémère de celui-ci dans

47 - Deléage, op. cit. in n. 44, 65.

48 - Haeckel (1877), op. cit. in n. 46, 346, nous soulignons.

49 - Haeckel (1877), op. cit. in n. 46, 346.



I. Age archéolithique ou primordial. . . . .	53,6
II. Age paléolithique ou primaire . . . . .	32,1
III. Age mésolithique ou secondaire . . . . .	11,5
IV. Age céolithique ou tertiaire. . . . .	2,3
V. Age anthropolithique ou quaternaire . . . . .	0,5
Somme. . . . .	100,0

**Figure 7**

*Proportions de la durée des âges dans l'histoire de la Terre selon Haeckel. Source : Haeckel (1877), op. cit. in n. 46, 348.*

l'histoire de la Terre : « [...] sa durée s'évanouit presque devant celle de l'énorme laps de temps, qui s'est écoulé depuis le commencement de la vie organique sur la Terre jusqu'à la formation du genre <sup>50</sup>. » Haeckel va jusqu'à calculer cette part, qui correspond dans son système à 0,5 % ; mais tout en ayant conscience de cette très courte durée, il maintient son « âge anthropolithique » au même niveau hiérarchique que les autres âges (fig. 7).

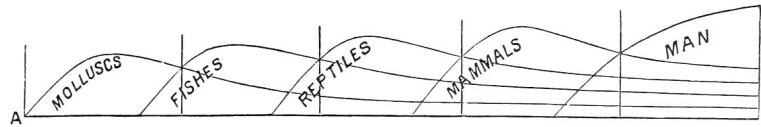
De manière surprenante, Haeckel conserve cette typologie dans d'autres écrits, notamment dans son ouvrage sur l'homogénéité, *Anthropogenie oder Entwicklungsgeschichte des Menschen*, réédité six fois de son vivant, jusqu'en 1910 <sup>51</sup>. Finalement, en insistant sur la brièveté de l'« âge anthropolithique » tout en maintenant, précisément, sa fonction d'âge, Haeckel augmente le crédit conféré à cette catégorie qui trouve sa justification historique non pas comme événement tellurique ou climatique, mais comme étape de l'évolution.

Professeur à l'université de Californie, Joseph LeConte (1823-1901) s'est fait remarquer pour ses contributions dans le domaine de la géologie. Pratiquant l'alpinisme dans le Yosemite, il fut, avec John Muir, l'un des fondateurs du Sierra Club, l'une des plus grandes organisations environnementalistes au monde et aussi la plus ancienne <sup>52</sup>. Dans plusieurs de ses écrits, LeConte intro-

50 - Haeckel (1877), op. cit. in n. 46, 346.

51 - Ernst Haeckel, *Anthropogenie oder Entwicklungsgeschichte des Menschen* (Leipzig : W. Engelmann, 1910), 497-522.

52 - Hansen, op. cit. in n. 7, 292.



**Figure 8**

Diagramme illustrant la dynamique d'instauration des classes dominantes à travers l'histoire de la Terre selon LeConte. Source : LeConte (1890), op. cit. in n. 53, 281.

duit la notion d'ère Psychozoïque (*Psychozoic era*). Ce choix tient chez lui à une conception cumulative de l'histoire de la Terre adossée à l'évolution biologique<sup>53</sup>.

Pour autant, il ne s'agit pas d'affirmer que les révolutions successives font à chaque fois table rase. Les classes ne disparaissent pas, mais se trouvent « soumises à la classe dominante qui leur succède », ce qui a pour effet de rendre le règne vivant « de plus en plus complexe<sup>54</sup> ».

LeConte rappelle que les changements constatés dans l'ordre des roches (systèmes, séries, formation) sont censés correspondre à ceux du vivant, mais que, dans le cas d'une discordance, il faut se référer à l'évolution du vivant et non pas à ce qu'il estime être des « divisions artificielles de l'enregistrement » (*artificial divisions of the record*<sup>55</sup>). En effet, l'évolution de la vie est plus certaine que celle des strates. Par conséquent, pour statuer sur l'existence d'un « Psychozoïque », il faut décider si, sur le plan de l'histoire du vivant, l'apparition de l'humanité relève d'un événement suffisamment important. Compte tenu de l'exceptionnalisme humain de l'époque, on attendrait que LeConte réponde par l'affirmative, mais il nous surprend : « D'un point de vue purement structurel et animal, affirme-t-il, l'humanité est étroitement liée au "règne animal". Elle n'en est pas séparée, elle y possède une position identifiable : elle appartient au genre des Vertébrés (*department*), à la classe des Mammifères, à l'ordre des Primates et à

53 - Joseph LeConte, *Elements of geology : A text-book for colleges and for the general reader*, 2<sup>e</sup> éd. (New York : D. Appleton, 1890), 280. Nous utilisons son manuel de géologie, destiné à ses étudiants, dans la mesure où il représente la systématisation la plus importante de ses positions. Ses autres écrits relatifs au Psychozoïque sont plus anciens, voir par exemple Joseph LeConte, *A compend of geology* (New York : D. Appleton, 1884).

54 - LeConte (1890), op. cit. in n. 53, 281.

55 - LeConte (1890), op. cit. in n. 53, 282.

la famille des Hominidés<sup>56</sup>. » En revanche, le problème est de savoir quelle conception de la relation entre l'humanité et la nature doit présider à la définition d'une unité de temps géologique. Du point de vue physique, elle ne se distingue pas suffisamment des autres animaux : « Mais du point de vue psychique (*psychical*) il est tout bonnement impossible de surestimer l'espace qui sépare l'homme des autres choses qui lui sont inférieures<sup>57</sup>. »

Donc, la conséquence sur l'histoire de la Terre ne peut en être ignorée :

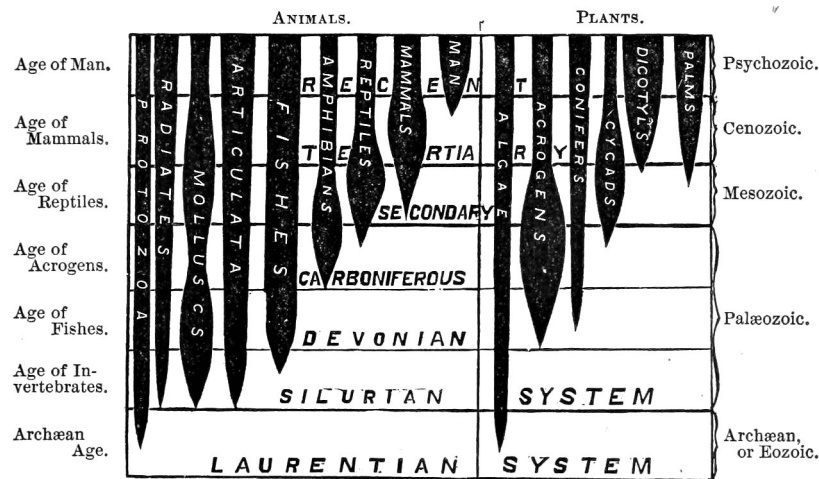
« [...] d'un certain point de vue l'ère de l'homme n'est pas équivalente d'une ère, ni d'un âge, ni d'une période, ni même d'une époque. Mais d'un autre point de vue, c'est l'équivalent de toute l'histoire géologique de la Terre entière. Car l'histoire de la terre *trouve son couronnement, son interprète et sa signification en l'homme*<sup>58</sup>. »

C'est que le Quaternaire, ainsi que tous les âges précédents, n'était que le théâtre « de la force brutale et de la férocité animale ». La disparition des animaux dangereux et leur diminution de taille, ainsi que l'introduction des organismes vivants utiles sont ainsi des phénomènes normaux, en tant qu'ils sont la marque du « règne de l'homme ». Et, chez LeConte, c'est cette matérialité des changements qui permet de trancher, ou plutôt de confirmer son hypothèse. Il s'agit d'une autre « et peut-être meilleure raison de faire cette division » : un changement se produit « sous nos yeux » par l'« agentivité » (*agency*) de l'hu-

56 - LeConte (1890), *op. cit.* in n. 53, 603.

57 - LeConte (1890), *op. cit.* in n. 53, 604. Il faut considérer que pour LeConte, il n'y a pas de discontinuité spirituelle entre l'humanité et le reste de la création. De son point de vue, la divinité est immanente à la nature et toutes les créatures (y compris le monde inorganique) ont en elles un « esprit immortel », qui n'est pas la conscience mais une forme d'énergie. Cependant, l'apparition de l'humanité fait surgir un nouveau plan de son fonctionnement, non pas avec la conscience mais avec la « vie morale et rationnelle ». Joseph LeConte, *Evolution : Its nature, its evidences, and its relation to religious thought*, 2<sup>e</sup> éd. (New York : D. Appleton and Company, 1899), 311-330. Plus encore, cet ouvrage portant sur l'évolution, LeConte affirme : « [...] la Nature, à travers toute l'histoire géologique de la Terre, fut la mère enceinte de l'esprit qui, après son long développement embryonnaire, vient à naître et trouver vie et immortalité en l'homme. » *Ibid.*, 329.

58 - « [...] *from one point of view the era of man is not equivalent to an era, nor to an age, nor to a period, nor even to an epoch. But from another point of view it is the equivalent of the whole geological history of the Earth besides. For the history of the Earth finds its consummation, and its interpreter, and its significance, in man.* » LeConte (1890), *op. cit.* in n. 53, 604.



**Figure 9**  
Répartition des classes d'animaux en fonction des ères géologiques d'après Leconte.  
Source : LeConte (1890), op. cit. in n. 53, 285.

manité et ce changement « sera abouti lorsque l'homme civilisé (*civilized man*) dominera toute la Terre<sup>59</sup> ». Parmi les éléments habituels du changement, LeConte relève l'extinction d'espèces provoquée par l'humanité.

En cette fin de xix<sup>e</sup> siècle, les conceptions d'une période géologique d'origine humaine s'attachent de manière prédominante à l'événement que constitue l'apparition de l'humanité dans l'histoire du vivant. Cela s'explique par le fait que c'est l'histoire de la vie qui structure l'histoire de la Terre à cette époque, et ce en partie encore aujourd'hui. Cependant, on peut observer une tendance progressive à la factualisation de l'activité géologique d'origine humaine : elle reste principalement virtuelle mais de plus en plus décrite et détaillée, et elle se teinte comme nous allons le voir d'un certain pessimisme au début du xx<sup>e</sup> siècle.

Dans le manuel de géologie, à l'« intention de ses collègues », qu'il écrit avec son ancien élève et collègue géographe Rollin D. Salisbury (1858-1922), Thomas C. Chamberlin (1843-1928), géologue très influent au début du xx<sup>e</sup> siècle et qui reçut de nom-

59 - LeConte (1890), op. cit. in n. 53, 604-605.

breux prix<sup>60</sup>, consacre un chapitre entier à la « période récente ou humaine<sup>61</sup> ». Le livre est une reprise abrégée d'une monumentale somme en trois volumes écrite une décennie plus tôt et contenant des thèses semblables<sup>62</sup>. Par quel phénomène se caractérise la sortie du Pléistocène vers la période récente (qui sera plus tard nommée Holocène)? Outre le retrait des glaciers, deux « aspects exceptionnels » se manifestent : « le re-peuplement [par la vie animale et végétale] des terres dépeuplées par la glace et l'expansion de la race humaine<sup>63</sup> ».

Si la race humaine peut avoir pour origine les chaudes contrées d'Asie proche-orientale ou d'Afrique du Nord, elle s'est rapidement dispersée au gré de la « productivité du sol », facteur fondamental pour « l'évolution précoce de la civilisation ». Ici, Chamberlin et Salisbury soutiennent que l'appauvrissement des sols dans les contrées d'origine de l'humanité est lié au manque de « mesures protectives » (*protective measures*), explication qui rend compte « sans aucun doute » de la « richesse passée et de la pauvreté présente des peuples d'Orient<sup>64</sup> ». Avec « l'évolution des arts industriels », l'humanité a su progressivement se munir d'utiles ressources : « minerais métallifères, carburants et fertilisants fossiles, et matériaux utiles à la construction et à l'ornement tels que la pierre et l'argile ». Passant d'un « provincialisme » (*provincialism*), caractérisé par un tribalisme et la multiplicité des langues, à un cosmopolitisme (*cosmopolitanism*) rendu possible par le développement des réseaux de communication et d'énergie à grande échelle, l'humanité tend vers une forme d'état permanent d'« intercommunication<sup>65</sup> ». Ce récit de l'avènement de l'humanité permet aux auteurs d'introduire le sujet géologique.

« Les anciens géologues avaient tendance à estimer l'agentivité

60 - Dont le prix Hayden Memorial en 1920 et la médaille Penrose en 1927, plus haute distinction de la Société américaine de géologie, qu'il a par ailleurs présidé au milieu des années 1880.

61 - Chapitre xxx, in Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 667-684.

62 - Thomas C. Chamberlin et Rollin D. Salisbury, *Geology* (New York : H. Holt and Company, 1904).

63 - Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 668.

64 - Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 680. Ce récit participe du discours colonial sur la supposée mauvaise gestion des terres par les peuples d'Afrique du Nord ; voir à ce sujet Diana K. Davis, *Les Mythes environnementaux de la colonisation française au Maghreb* (Seyssel : Champ Vallon, 2012).

65 - Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 681.

(*agency*) de l'homme au sein des processus géologiques comme triviale [...]. Le fait est que, probablement, aucun agent (*agent*) antérieur à l'homme [dans la terminologie de Chamberlin, un agent peut être l'atmosphère, les volcans, la vie ou les océans] n'avait eu autant d'influence, au cours d'une durée équivalente, sur la vie terrestre, ou sur la vitesse de détérioration de la terre, depuis l'avènement de l'époque de l'agriculture. [...] Les exceptions plus patentes à la domination de l'homme [...] se trouvent dans les organismes trop petits pour être aisément contrôlés par lui, et dans les organismes qui, tout à fait à l'encontre de sa volonté, prospèrent sur les conditions qu'il leur fournit. Néanmoins, même l'évolution accélérée de ces organismes fait partie de la profonde révolution biologique (*biological revolution*) qui accompagne la domination de l'homme<sup>66</sup>. »

Le ton est ici teinté d'un certain pessimisme, quoique le cadre général du propos donne plutôt à penser l'inverse. En effet, les auteurs soulignent que le « contrôle de l'homme » (*Man's control*) ne s'est pas distingué par sa considération pour les « interrelations complexes entre les organismes » et pour les conséquences de ses actes : « Dans sa plus grande partie, l'homme a été guidé par des considérations immédiates, et même celles-ci n'étaient pas aiguillées par une grande intelligence. Par conséquent, c'est avec beaucoup de sauvagerie (*wantonness*) qu'il a détruit à la fois la vie végétale et animale<sup>67</sup>. » Cependant, l'optimisme vient racheter un sombre tableau puisqu'une attitude plus « intelligente » et « compatissante » semble se développer, pour devenir « bientôt dominante ». Mais on aurait tort d'y voir un embryon d'écologisme, puisque c'est bien une maîtrise accrue sur la nature qui annonce ce temps de pacification : « Nous sommes à l'aube d'une nouvelle ère dans le contrôle et la sélection (*control and selection*). De nouvelles variétés sont en train d'être pro-

66 - « The earlier geologists were inclined to regard man's agency in geological progress as rather trivial, perhaps because physiographic geology, in which his influence is felt chiefly, was then less studied than other phases with which he has little to do. The fact probably is that no previous agent, in an equal period of time, has so greatly influenced the life of the land, or the rate of land-degradation, as man has since the agricultural epoch was well established. [...] The most pronounced exceptions to man's dominance, and those that bid fair to contest his supremacy longest, are found in organisms too minute to be controlled easily by him, and in organisms that, quite against his will, flourish on the conditions he furnishes. But even the accelerated evolution of these organisms is a part of the profound biological revolution which attends man's dominance. » Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 681-682.

67 - Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 683.

duites qui non seulement s'écartent grandement des souches précédentes, mais divergent selon des lignées choisies afin de répondre à des conditions précises ou pour produire des produits désirés<sup>68</sup>.»

Pour les auteurs, l'agentivité géologique de l'humanité passe d'abord par sa puissance d'altération et de contrôle du vivant : son importance géohistorique leur semble indéniable. Mais il y a un autre aspect. S'interrogeant, dans un article au sujet de la controverse des restes humains de Vero<sup>69</sup> (Californie), sur un critère pertinent de démarcation entre le Pléistocène et la période récente ou « Âge de l'homme », ainsi que sur leur relation d'inclusion ou d'exclusion, Chamberlin avance un argument significatif : « Les étapes cruciales d'extinction et d'introduction d'espèces, et de modification de la surface de la Terre [par les humains] fournissent des fondements pour la reconstruction de nos idées et de nos doctrines. Ils offrent un point de départ d'une très grande valeur suggestive. Une étape tout à fait vitale de cette combinaison physico-dynamico-bio-psychique est l'art et l'industrie humaine (*human art and industry*). Cela devient un critère supplémentaire crucial<sup>70</sup>. » En effet, cette évolution étant très rapide, bien plus que l'évolution des espèces, elle est d'autant plus, selon Chamberlin, un critère de « progrès historique » (*historical progress*). Ici Chamberlin fait référence aux changements dont il a été le témoin, plus brefs selon lui que ceux auxquels les dix générations précédentes ont pu assister<sup>71</sup>.

68 - Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 683.

69 - En 1916, le géologue Elias Sellards mène des excavations qui le conduiront à soutenir la présence d'êtres humains sur le continent américain avant l'Holocène. Il y excave notamment des corps humains qu'il date du Pléistocène. Cette analyse sera vivement disputée dans les années qui suivent, y compris par Chamberlin. L'enjeu plus général était de savoir si le continent avait été peuplé avant ou pendant l'Holocène et cet enjeu s'est alors cristallisé sur ce site. La présence humaine pré-holocénique sur le site original de Vero reste encore aujourd'hui controversée, malgré des fouilles récentes – en revanche, la présence humaine avant l'Holocène sur le continent américain a bien été archéologiquement attestée ailleurs. Voir J. M. Adovasio, C. A. Hemmings, F. J. Vento, J. S. Duggan, et J. H. Higley, What we learned at the old Vero site (8IR009), Vero Beach, Florida : 2014-2017, *PaleoAmerica*, 5/3 (2019), 231-261.

70 - Thomas C. Chamberlin, Investigation versus propagandism, *The Journal of geology*, 27/5 (1919), 305-338, 336. Ailleurs, Chamberlin décrit succinctement l'altération des strates par l'action humaine, voir à ce sujet Thomas C. Chamberlin, The age of the Earth from the geological viewpoint, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 61/4 (1922), 247-271, 252.

71 - Chamberlin (1919), *op. cit.* in n. 70, 335-336.

Cependant, c'est véritablement vers le futur que se dessine une époque géologique humaine, ce pourquoi est requis une « anticipation géologique » (*geologic forecast*). Pour les auteurs du manuel de géologie, ce futur n'est peut-être pas celui d'un refroidissement inexorable, correspondant selon eux à une *doxa* seulement hypothétique. Parmi d'autres facteurs, Chamberlin estime que l'humanité a un rôle géologique à jouer, notamment dans ses dimensions morale et industrielle. Si la morale tend à la « rectitude altruiste », l'industrie est en train de soumettre les forces de la nature ; la combinaison des deux sera la garantie de la longévité de l'ère de l'humanité <sup>72</sup>.

Ainsi, l'habitabilité de la Terre n'est pas nécessairement vouée à prendre fin dans une gangue de glace. S'opposant à la théorie nébulaire, Chamberlin et Salisbury affirment, dans leur manuel, qu'on peut concevoir une Terre se construisant lentement, « conservant ses énergies » et profitant de celles des étoiles et, *in fine*, une habitabilité sans limite. Dès lors, on peut tout à fait s'autoriser à anticiper une ère « Psychozoïque », de même échelle que le Cénozoïque ou le Paléozoïque, ou encore aussi longue que les éons cosmiques ou biotiques. Certes « spéculative », cette thèse optimiste a un avantage probabiliste sur son contraire : « Une évolution incommensurablement plus élevée que celle d'aujourd'hui – et dont les accomplissements dépassent nos facultés de compréhension – est un espoir raisonnable (*reasonable hope*). » Une telle anticipation apporte une « grande satisfaction morale » à l'histoire de la Terre autant qu'une forte stimulation personnelle à contribuer à l'avènement d'un tel âge <sup>73</sup>.

Finalement, l'humanité étant considérée comme la créature dont le développement de l'intellect est sans commune mesure au reste du vivant, est par là-même apothéose de l'évolution, quoique les conditions concrètes de son apparition restent mystérieuses <sup>74</sup>. Il n'en reste pas moins qu'il y a une véritable rupture ontologique dans l'histoire de l'évolution, et, partant, dans l'histoire de la Terre : « [...] L'émergence de ce que nous

72 - Thomas C. Chamberlin, A geologic forecast of the future opportunities of our race, *Science*, vol. 30, n° 783 (31 décembre 1909), 937-949.

73 - Chamberlin et Salisbury, *op. cit.* in n. 1, 683-684.

74 - Thomas C. Chamberlin, *The Origin of the Earth* (Chicago : The University of Chicago Press, 1916), 247.



appelons le vivant depuis l'inorganique, et l'émergence de ce que nous appelons le psychique depuis le physiologique, ont été en même temps des aspects transcendants et transcendantsaux de l'évolution de la Terre<sup>75</sup>.» Ainsi, chez Chamberlin, il existe clairement une époque humaine, certes tournée vers le futur, mais déjà visible, constatable, géologiquement caractérisable, dont on peut dresser un tableau positif – duquel contempler le reste des profondeurs historiques de la création.

Chamberlin n'est pas un cas isolé : d'autres ouvrages de géologie commentent l'action géologique de l'humanité en ce début de xx<sup>e</sup> siècle, en la teintant d'un certain pessimisme, mais sans remettre profondément en question une confiance dans le progrès. Nous pouvons indiquer à ce titre deux exemples.

Le premier est un ouvrage préfacé par l'éminent paléontologue Arthur S. Wordwood (1864-1944). L'auteur, Robert Sherlock (1875-1948), géologue à la British Geological Survey, l'écrit pour un large public et il cherche à y décrire les conséquences géologiques de l'action humaine, y compris la question du changement climatique par la combustion des combustibles fossiles. Cependant, après avoir dressé son panorama, Sherlock constate qu'il n'y a pas de raison de considérer que l'action humaine est plus artificielle que celle des autres animaux : eux aussi exercent une influence sur les sols et plus généralement sur leur environnement. De plus, ajoute-t-il, si la question de l'activité humaine a bien sa place dans les manuels de géologie, elle reste « insignifiante » tant sa durée est petite devant celle de « l'histoire géologique<sup>76</sup> ». Quelle que soit l'ampleur de l'action géologique de l'humanité, Sherlock la considère compatible avec la préservation et la protection des milieux, en mettant par exemple en place des dispositifs d'ingénierie hydrologique<sup>77</sup>.

Le second exemple est celui du professeur de géologie à l'université de Harvard, Nathanael S. Shaler (1841-1906), dont Bergson est un lecteur. Au début du xx<sup>e</sup> siècle, ce géologue publie un livre assez court traitant de l'influence humaine sur les mondes or-

75 - Chamberlin, *op. cit.* in n. 74, 262.

76 - Robert Lionel Sherlock, *Man as a geological agent : An account of his action on inanimate nature* (Londres : H. F. & G. Witherby, 1922), 345.

77 - Voir aussi son autre ouvrage, moins fréquemment cité : Robert Lionel Sherlock, *Man's influence on the Earth* (Londres : T. Butterworth, 1931).

ganiques et inorganiques, mais en insistant particulièrement sur les limites des ressources que les sociétés industrielles emploient. Regrettant qu'elles n'aient pas le souci des générations futures, Shaler estime qu'elles se comportent comme des enfants<sup>78</sup>. L'appel de Shaler à plus de « dignité » et de « noblesse<sup>79</sup> » n'aboutit pas pour autant à soumettre l'idée d'une période géologique correspondant à l'action humaine ; ce n'est guère surprenant, étant donné le statut d'essai grand public de ce texte<sup>80</sup>.

Ainsi, si l'ancrage ontologique est clairement conservé, on constate à partir du dernier tiers du xix<sup>e</sup> siècle une montée progressive vers un souci pour caractériser et justifier empiriquement un âge de l'humanité dans l'histoire de la Terre. Plus généralement, ce mouvement s'effectue dans le contexte de la fin du xix<sup>e</sup> et du début du xx<sup>e</sup> siècle, marqué par de nombreux discours sur la finitude des ressources, y compris minières et fossiles, où la « question des matières premières est donc devenue [...] l'objet de préoccupations qui se positionnent très explicitement à l'échelle mondiale<sup>81</sup> ».

## L'humanité dans le Quaternaire et l'Holocène

Que l'histoire de la Terre et de l'humanité aient semblé déconnectées dans les débats contemporains tient sans doute au fait que les différents termes jusqu'ici examinés n'ont pas été adoptés majoritairement. Dans les traités et les dictionnaires compilant les savoirs géologiques, le rôle et l'importance de l'humanité dans l'histoire de la Terre semblent très incertains entre le xix<sup>e</sup> et le début du xx<sup>e</sup> siècle. Le livre du vulgarisateur Louis Figuier (1819-1894), *La Terre avant le déluge*, n'y fait aucunement

78 - Nathaniel Southgate Shaler, *Man and the Earth* (New York : Fox, Duffield & Company, 1905), v.

79 - Shaler, *op. cit.* in n. 78, 228.

80 - Parmi d'autres, on peut aussi ajouter Charles Schuchert (1858-1942), professeur de géologie à l'université de Yale, qui fait sienne la catégorie du Psychozoïque. Charles Schuchert et Louis Pirsson, *A text-book of geology : For use in universities, colleges, schools of science, and for the general reader*, 2<sup>e</sup> éd. (New York : John Wiley & Sons, 1924).

81 - Jean-Baptiste Arrault, « Penser à l'échelle du monde. Histoire conceptuelle de la mondialisation en géographie (fin du xix<sup>e</sup> siècle / entre-deux-guerres) », thèse de doctorat (univ. Paris-1-Panthéon-Sorbonne, 2007), 282. Voir également Fredrik Albritton Jonsson, *The Origins of cornucopianism : A preliminary genealogy*, *Critical historical studies*, 1/2 (2014), 1-18.

référence<sup>82</sup>, pas plus que le *Traité de géologie* d'Albert de Lapparent<sup>83</sup> (1839-1908), l'*Encyclopédie générale des Deux-Mondes*<sup>84</sup>, le *Traité élémentaire de géologie, minéralogie et géognésie* de Barruel<sup>85</sup> (1798-1863), ou encore le *Manual of elementary geology* de Lyell<sup>86</sup>. Du côté des dictionnaires, la situation est équivalente. Le *Dictionnaire de géologie* d'Adolphe Chesnel (1791-1862), bien que participant d'une « encyclopédie théologique » et évoquant une septième époque, ne confère pas explicitement de place centrale à l'humanité<sup>87</sup>; les dictionnaires de Chanel et Landrin, quant à eux, ne mentionnent que le terme « Anthropéien » pour qualifier les terrains appartenant à la formation dans laquelle est apparue l'humanité<sup>88</sup>; les dictionnaires de Beaujean, Coder et Meunier n'y font même pas référence<sup>89</sup>. Le géologue suisse Eugène Renevier (1831-1906) inclut certes dans son *Tableau des terrains sédimentaires* de 1874 une « période anthropique » qui succède au quaternaire<sup>90</sup>, mais toute mention d'un âge de l'humanité disparaît dans la seconde édition renommée *Chronographe géologique* en 1897<sup>91</sup>.

Tout porterait ainsi à croire que durant le xix<sup>e</sup> siècle et le début du xx<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire durant la période durant laquelle la géologie se constitue comme discipline, l'idée d'un temps humains dans l'histoire de la Terre disparaît des considérations légitimes du géologue. C'est ce que laissent entendre les men-

82 - Louis Figuier, *La Terre avant le déluge*, 4<sup>e</sup> éd. (Paris : Hachette, 1864).

83 - Albert de Lapparent, *Traité de géologie* (Paris : Librairie F. Savy, 1885).

84 - Ferdinand de Boyères et al. (dir.), *Encyclopédie générale des Deux-Mondes* (Paris, 1874).

85 - Germain Barruel, *Traité élémentaire de géologie, minéralogie et géognésie* (Paris : Aimé André, 1839).

86 - Lyell, *op. cit.* in n. 13.

87 - Adolphe de Chesnel et Jean-Baptiste-Joseph Champagnac, *Dictionnaire de géologie : Suivi d'esquisses géologiques et géographiques* (Petit Mont-Rouge : J.-P. Migne, 1849).

88 - Émile Chanel, *Dictionnaire de géologie, étymologie, paléontologie, minéralogie* (Bourg : Courrier de l'Ain, 1897); Henri Landrin, *Dictionnaire de minéralogie, de géologie et de métallurgie* (Paris : Firmin Didot, frères, 1856).

89 - Victor Beaujean, *Dictionnaire des principaux termes de géographie, de topographie, de géologie et d'art militaire* (Bruxelles : C. Muquardt, 1882); Victor Coder, *Dictionnaire abrégé de géologie* (Marseille : impr. de A. Garry, 1891); Stanislas Meunier, *Dictionnaire de géologie* (Paris : Dunod, 1926).

90 - Eugène Renevier, *Tableau des terrains sédimentaires formés pendant les époques de la phase organique du globe terrestre* (Lausanne : Librairie Rouge & Dubois, 1874), 15-16. Cité dans Federau, *op. cit.* in n. 7, 162.

91 - Eugène Renevier, *Chronographe géologique* (Lausanne : G. Bridel, 1897).

tions de l'Anthropozoïque dans les dictionnaires contemporains : « descriptif informel du temps géologique depuis l'apparition de l'homme », dit le *Glossary of geology* de Neuendorf *et al.*<sup>92</sup> ; « terme parfois utilisé pour désigner le Quaternaire<sup>93</sup> » mentionne le dictionnaire de Foucault et Raoult en 2010, tout en précisant que le terme est obsolète.

Or, plutôt qu'une tendance mineure de la géologie, la question de la place de l'humanité dans l'histoire de la Terre n'a cessé d'être interrogée dans la géologie que l'on pourrait estimer légitime pour les <sup>xix</sup><sup>e</sup> et <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècles. Tout d'abord parce que les statuts universitaires de la plupart des auteurs précédemment examinés montrent qu'il serait inexact de disqualifier leurs positions au motif qu'elles relèveraient de spéculations anodines d'individus mal informés, ou, encore, de non-scientifiques. Cependant, il y a une raison plus fondamentale qui permet d'éclairer la question humaine au sein de la géologie moderne et cette raison peut se trouver dans les définitions des ultimes séquences temporelles de l'histoire de la Terre.

Pour le montrer, on peut se référer à l'usage du Quaternaire tel qu'il est défini durant le <sup>xix</sup><sup>e</sup> et au début du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle. Terme introduit par Jules Desnoyers (1800-1887) en 1829, il est très souvent caractérisé en fonction de l'apparition de l'espèce humaine. Selon le dictionnaire de Chanel (1897) « le fait caractéristique de l'ère quaternaire ou moderne est l'apparition de l'homme sur la terre<sup>94</sup> » ; et le dictionnaire de Meunier, tout en précisant que le Quaternaire reste mal défini, affirme également : « Le grand événement du Quaternaire, c'est l'apparition bien constatée de l'homme<sup>95</sup>. » Figuiet, dont l'ouvrage a été lu par d'importants géologues de son époque<sup>96</sup> et qui ne mentionnait aucun des termes examinés jusqu'ici, affirme au sujet du Quaternaire : « Mais le fait qui domine l'époque quaternaire, et en même temps toutes les phases que nous a présentées

92 - Klaus K. E. Neuendorf, James P. Mehl, et Julia Jackson (dir.), *Glossary of geology* (Alexandria : Springer, 2005), 28.

93 - Alain Foucault et Jean-François Raoult, *Dictionnaire de géologie : Géophysique, préhistoire, paléontologie, pétrographie, minéralogie* (Paris : Dunod, 2010), 20.

94 - Chanel, *op. cit.* in n. 88, 213.

95 - Meunier, *op. cit.* in n. 89, 553.

96 - Alexandre Fediaevsky, *Aperçu de la vulgarisation géologique de 1860 à 1888, Travaux du Comité français d'histoire de la géologie*, 3 (1985), 75-83.

jusqu'ici l'histoire de la Terre, c'est l'apparition de l'homme, œuvre culminante et suprême du Créateur de l'univers<sup>97</sup>.» Ce n'est pas uniquement ce fait d'apparition qui est posé dans son autonomie, mais que cette apparition est une nouveauté radicale, en tant qu'« [...] être intelligent et doué de la faculté d'abstraire<sup>98</sup> ». Dans le traité de Lapparent, « l'époque quaternaire » est « caractérisée par l'apparition de l'homme sur le globe » quoique « depuis que ce grand fait s'est produit, la géographie terrestre paraît [...] n'avoir subi que des changements insignifiants<sup>99</sup> ».

En outre, il est instructif de se référer aux échanges qui animent les congrès internationaux de géologie au XIX<sup>e</sup> siècle, dont le premier se tient à Paris en 1878. On insiste souvent sur l'hypothétique soumission de l'époque d'Holocène durant le deuxième congrès, en 1881 à Bologne<sup>100</sup>, mais c'est plutôt vers les échanges relatifs au Quaternaire durant le quatrième congrès à Londres en 1888 qu'il est intéressant de se tourner. Peu avant le déjeuner, un groupe de géologues, dont Renevier et Lapparent, débattent d'un enjeu fondamental : la séparation entre les terrains quaternaires et tertiaires. Sous cette question se cache le véritable enjeu : existe-t-il vraiment un terrain quaternaire et qu'est-ce qui permet de le définir ? Le débat oppose, d'une part, Renevier et, d'autre part, la plupart des géologues intervenant dans le débat. Pour le premier, il n'y a aucune raison d'attribuer au Quaternaire une valeur comparable aux autres subdivisions chronologiques de premier ordre : Tertiaire, Secondaire, Primaire. Ces dernières font alors partie des nomenclatures stratigraphique et chronologique décidées par convention au cours du congrès de Bologne en 1881, qui, par ailleurs, reporte aux prochains travaux du Comité de la Carte d'Europe la décision concernant les dé-

97 - Figuiet, *op. cit.* in n. 82, 331.

98 - Figuiet, *op. cit.* in n. 82, 401.

99 - Lapparent, *op. cit.* in n. 83, 1074.

100 - La définition de l'Holocène est elle-même anthropocentrée : « On pourrait aussi appeler holocènes, ceux de l'époque historique, ou dont le dépôt n'est pas antérieur à la présence de l'homme », selon Paul Gervais, *Mémoires de la section des sciences de l'académie des sciences et des lettres de Montpellier* (1850), 413. Cependant, contrairement à ce qu'affirment nombre d'auteurs dont Crutzen et Steffen, et bien d'autres, aucune mention n'est faite de cette catégorie comme enjeu d'échanges, ni de celle du « Récent », dans les comptes rendus des congrès de Bologne (1881) et Berlin (1885).

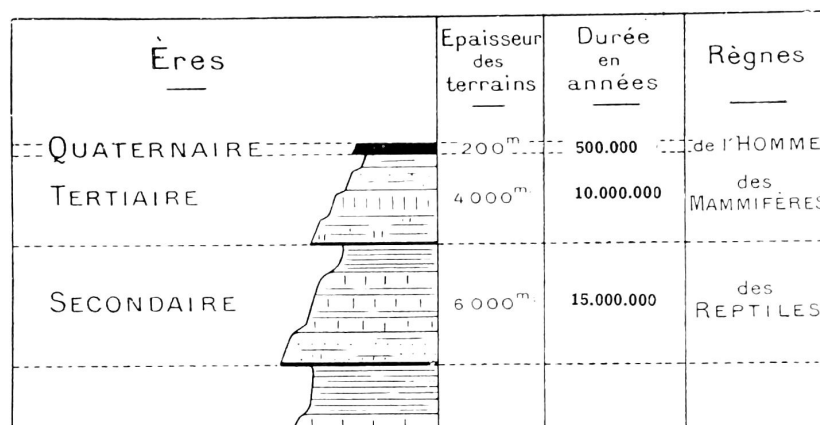
pôts quaternaires<sup>101</sup>. Renevier affirme que du point de vue de l'évolution du vivant, il n'y a pas de rupture avec le Tertiaire; le Quaternaire pourrait même être une subdivision de ce qu'on nomme le Pliocène. Ni les glaciations, qui ont commencé dans le Tertiaire, ni le fait que l'apparition de l'humanité se soit produite durant le Quaternaire, ni le caractère primordial de cette apparition, ne constituent pour lui des critères solides. Par conséquent, « M. Renevier considère le Quaternaire comme une subdivision du Tertiaire, qu'il désignera sous le nom de Pléistocène. »

Aux autres géologues de répondre alors, comme d'un seul bloc. Pour ceux-là, il s'est bien passé un événement propre à légitimer l'ouverture d'une nouvelle phase (ère, groupe) quelle que soit sa durée ou l'épaisseur du terrain qui lui correspond : l'apparition de « l'homme ». Il s'agit de « conserver toute son importance systématique à cette grande apparition de notre espèce »; de faire valoir un classement « des âges du monde d'après les phénomènes biologiques ». L'autre argument principal est l'utilité de l'existence du Quaternaire : assumant entièrement le caractère conventionnel des divisions temporelles, l'adoption d'un système où les faits relatifs à l'action humaine peuvent être classés « se recommande de façon évidente<sup>102</sup> ».

Certes, la question qui se pose aux géologues est de savoir comment administrer la preuve sur une phase aussi courte, mais il est possible de trouver tout au long du xx<sup>e</sup> siècle des références soit à un terme particulier, comme « Psychozoïque », soit des débats relatifs à la hiérarchisation des époques ou des périodes les plus récentes, nommément l'Holocène et surtout le Quaternaire, où la question de l'action humaine fait partie des facteurs prin-

101 - Congrès géologique international, *Compte rendu de la deuxième session, Bologne, 1881* (Bologne : Impr. Fava et Garagnani, 1882), 196-198.

102 - Congrès géologique international, *Compte rendu de la quatrième session, Londres, 1888* (Londres : Dulau et c<sup>ie</sup>, 1891), 41-44.



**Figure 10**

Représentation de la « succession générale des ères géologiques [...] et de leurs grandes caractéristiques paléontologiques ». Cette figure, qui n'est pas sans rappeler celles du XIX<sup>e</sup> siècle, est présente dans un ouvrage de 1921. Professeurs au Muséum national d'histoire naturelle et tous deux directeurs de l'Institut de paléontologie humaine, les auteurs, Marcellin Boule et Henri Vallois commentent : « [...] l'Ère quaternaire, ou anthropozoïque, ou psychozoïque, qui dure encore est caractérisée par le règne du plus perfectionné des Mammifères, l'Homme. » Cette figure est présente jusqu'à la 4<sup>e</sup> éd. (1952), elle est un exemple de la longévité des catégories « anthropocénoides » mais surtout des présupposés de nature paléontologique qui en autorisent l'usage. Source : Boule et Vallois, op. cit. in n. 103, 26.

cipaux de démarcation<sup>103</sup>.

<sup>103</sup> - Le terme « psychozoïque » est assez courant jusqu'aux années 1960 au moins, mais utilisé dans des contextes énonciatifs différents. Généralement il dénote toujours la possibilité d'une thématization de la question humaine dans l'histoire de la Terre. Voir par exemple : Amadeus William Grabau, *Principles of stratigraphy* (New York : A. G. Seiler and Company, 1913); Roy Lee Moodie, *Paleopathology : An introduction to the study of ancient evidences of disease* (Urbana : University of Illinois Press, 1923); Roy Lee Moodie, *The Geological history of the vertebrates of Indiana and their position in the ancient North American fauna* (Indianapolis : W. B. Burford, 1929); Richard Foster Flint, *Glacial geology and the Pleistocene epoch* (Londres et New York : John Wiley & Sons, 1947); Marcellin Boule et Henri Victor Vallois, *Les Hommes fossiles : Éléments de paléontologie humaine* (Paris : Masson, 1952 [1921]); Samuel N. Namowitz, *Earth science : The world we live in* (New York : Van Nostrand, 1953); Carl Owen Dunbar et John Rodgers, *Principles of stratigraphy* (New York : John Wiley & Sons, 1957); Rhodes Whitmore Fairbridge, *The Encyclopedia of geomorphology* (New York : Reinhold Book Corporation, 1968). Cependant, il faut encore insister sur le fait que la recherche lexicale, certes importante, ne doit pas occulter la recherche portant sur l'espace de signification propre à l'agentivité ou la caractérisation géologique relative à l'humanité.

Par exemple, au milieu des années 1960, la conséquente *Encyclopedia of Earth sciences* que dirige Rhodes Fairbridge (1914-2006), professeur de géologie à l'université de Columbia connu notamment pour avoir établi la courbe d'élévation du niveau des océans sur 10 000 ans, explique :

« LeConte voulait que le « Récent » soit la dernière époque d'une série appartenant au Quaternaire et que ce dernier soit élevé au statut d'une ère, du fait qu'elle était dominée par l'homme, proposant de façon plutôt optimiste de la nommer ère Psychozoïque, l'ère de la raison, mais le terme n'obtint pas un grand soutien de la part de certains géologues cyniques. Néanmoins les géologues de l'Holocène reconnaissent clairement l'importance écrasante de l'homme comme agent géologique <sup>104</sup> [...] »

Durant la même séquence historique, c'est-à-dire entre le début du xx<sup>e</sup> siècle et les années 1980, le monde soviétique utilise quant à lui le terme d'« Anthropogène » (антропоген) pour désigner le Quaternaire notamment sous l'impulsion du géologue Andreï Pavlov (1845-1929). Durant la guerre froide, le terme russe habituellement traduit par « Anthropogène » a même été traduit par « Anthropocène », afin de mieux correspondre à la terminologie de l'Ouest <sup>105</sup>.

Que la définition de cette dernière catégorie ait été tributaire de sa relation avec l'avènement de l'humanité est enfin confirmé par le dictionnaire de Foucault et Raoult (2009) :

« Dernière période de l'histoire du globe, juste postérieure au Tertiaire avec lequel elle forme le Cénozoïque. Sa définition a beaucoup varié. On a longtemps tenté de lui faire correspondre l'apparition de l'homme et le début des grandes glaciations ré-

104 - « LeConte wanted to make "Recent" the last of several epochs in the Quaternary and to elevate the Quaternary to an era, in view of its domination by man, rather optimistically proposing for it the name of Psychozoic era, the age of reason, but the name has not much support from cynical geologists. Nevertheless Holocene geologists clearly recognize the overwhelming importance of man as a geological agent [...] » Fairbridge, *op. cit.* in n. 103, 525.

105 - Dominique Raynaud, « Anthropocène. Technique. Deux points de contact entre science et pensée partisane », *Zilsel*, 3/1 (2018) 267-268; Hansen, *op. cit.* in n. 7, 293. Nous nous opposons toutefois à la conclusion que tire Raynaud sur le caractère « idéologique » de la notion d'Anthropocène, dans la mesure où les auteurs n'oblitérent pas le passé de la notion : au contraire, dès les premiers articles, ils tentent de la lier un récit du « déjà-dit », quoiqu'il soit sur le mode de la série des précurseurs.



centes. Ces événements étant imprécis, on a préféré lui fixer une limite inférieure arbitraire mais bien définie dans les enregistrements sédimentaires<sup>106</sup>. »

Ici, la dernière phrase est importante : il ne s'agit pas de changer la définition du Quaternaire, mais bel et bien de méthode de datation, en la rapportant à un proxy sédimentaire et non plus à une estimation d'ordre paléontologique ou paléoclimatique, « imprécis », par rapport aux enregistrements rocheux. Dans la définition stratigraphique contemporaine de l'Holocène, sanctionnée par la Commission internationale de stratigraphie, Gibbard et Walker notaient que la question humaine dans l'histoire de la Terre permettait déjà de séparer les séries de l'Holocène de celles du Pléistocène<sup>107</sup> :

« Telle qu'elle est actuellement définie, nous vivons dans l'époque ou la série de l'Holocène, s'étendant sur les 11 700 dernières années de l'histoire de la Terre. Bien que, en termes strictement géologiques, [...] elle pourrait être conçue comme une unité de temps faisant partie de la période ou de la série du Pléistocène, l'émergence d'un nombre critique d'humains (*Homo sapiens*) et l'influence croissante qu'ils ont exercé sur les systèmes naturels apporte la justification cruciale permettant de définir cette période comme une unité à part entière<sup>108</sup> [...] »

## Conclusion

Dans cet article, nous avons contribué à interroger la réflexivité géologique des modernes, ce qui participe à éclairer les débats contemporains sur les enjeux écologiques globaux. Il apparaît que la thématization de l'action humaine sur la planète

106 - Foucault et Raoult, *op. cit.* in n. 93, 294. Nous soulignons.

107 - Philip L. Gibbard et Mike J. Walker, The term « Anthropocene » in the context of formal geological classification, *London Geological Society : Special publications*, 385/1 (2014), 29-37.

108 - « As currently defined, we are living in the Holocene series or epoch, the last 11.7 ka of Earth history. Although, on strict geological grounds, this period can be considered to be the latest of a sequence of interglacials that have characterized the Quaternary, and hence could be regarded as a unit of the Pleistocene series / epoch, the rise of humans (*Homo sapiens*) to critical numbers and the increasing influence they have exerted on natural systems provides the critical justification for defining this period as a separate unit of series / epoch status within the GTS. As such, the activities of humans cannot then be used again to justify the definition of a discrete Anthropocene division. » Gibbard et Walker, *op. cit.* in n. 106, 34.

fait partie des *topoi* courants de l'histoire de la géologie. Non seulement de nombreux termes sont depuis longtemps mobilisés pour qualifier une unité de temps d'essence humaine (Anthropozoïque, Psychozoïque, Anthropolithique, etc.), mais les unités de temps ultimes de l'histoire de la Terre (Holocène et Quaternaire) ont historiquement été définies en rapport avec le fait humain, et plus particulièrement les sociétés européennes ou coloniales. Nous avons mis en lumière au moins deux plans selon lesquels l'agentivité géologique de l'humanité a été pensée dans l'histoire : le premier se situe au niveau d'une ontologie du temps faisant de l'avènement de l'humanité un événement irréductible aux autres événements dans l'histoire de la Terre ; le second est de nature empirique et renvoie à des tentatives d'administrer les preuves matérielles démontrant l'altération profonde de la Terre par les humains.

Ainsi, plutôt que de partir de la supposition que l'humanité aurait été évincée des considérations géologiques, on pourrait tout autant se demander pourquoi la volonté de qualifier l'action humaine sur le plan géologique a tant duré. On peut alors se demander si l'agentivité géologique de l'humanité, plutôt qu'une manière de remplacer le Père à l'article de la mort, n'est pas également et dès le début un processus d'objectivation de ce qui se passe sous les yeux des acteurs du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle.

Sans doute, l'inscription de temps humains dans l'histoire de la Terre a-t-elle historiquement partie liée avec le récit de la Genèse, au moins jusqu'au premier tiers du XIX<sup>e</sup> siècle. Plus largement, on peut supposer que s'active, dans ce processus, une tendance à saisir l'héritage cosmologique chrétien dans un espace de savoir qui n'a de cesse d'obliger ses tenants à renouveler les grands récits. La théologie naturelle, refluant à partir du dernier tiers du XIX<sup>e</sup> siècle, n'emporte pas tout à fait avec elle ses cadres épistémiques<sup>109</sup>. Robert Davis suggère même que la disparition du divin dans l'espace conceptuel de la géologie laisse le champ pour l'introduction d'un acteur doué de conscience, d'esprit ou de raison qui soit en mesure de prendre la relève en tant

109 - Robert Fox, *Théologie naturelle et géologie à l'époque de William Buckland*, *Travaux du Comité français d'histoire de la géologie*, 3 (2001), 89-105 ; Davis, *op. cit.* in n. 7.

qu'auteur du monde : l'humanité <sup>110</sup>.

Cependant, il paraît difficile de simplement poser l'absence d'un concept sans expérience empirique (Dieu) pour expliquer l'apparition d'un centre de préoccupation qui concerne au premier chef les acteurs qui l'énoncent (les humains). Nous avons plutôt affaire à une ontologie naturaliste dans laquelle l'humanité dispose *de facto* d'un privilège par rapport au reste de la création et un tel privilège n'est pas nécessairement un pur produit de l'héritage chrétien <sup>111</sup>. Ce privilège est d'ailleurs lui-même ordonné à une action considérée civilisatrice, réputée caractéristique des sociétés européennes. En effet, on trouve bien des références très concrètes à l'agir industriel – ou « civilisateur » – des sociétés européennes et états-uniennes du xix<sup>e</sup> et du xx<sup>e</sup> siècle dans les écrits définissant alors une nouvelle planéarité <sup>112</sup>. Cette ontologie est associée à une conception progressiste de l'histoire permettant en quelque sorte de donner consistance – même géologique – à un futur qui rend possible et intéressant pour la géologie de s'intéresser à la place de l'humanité dans l'histoire de la Terre. La durée de cette association tend à montrer que l'humanité, au sommet de laquelle se trouverait, pour les auteurs de cette époque, la civilisation blanche-européenne, ne s'est pas effacée des positivités de la nature comme un visage de sable sous le déluge du Grand Partage, mais a au contraire formé un terrain de spéculations argumentées et de constructions narratives empiriquement informées <sup>113</sup>.

Il faudrait alors inverser l'hypothèse qui sous-tend la lecture courante de l'histoire de la géologie – à savoir l'indifférence des

110 - Davis, *op. cit.* in n. 7.

111 - D'autre part, le cadre chrétien lui-même n'implique aucunement un tel privilège de manière nécessaire.

112 - La notion de planéarité se rapporte dans la littérature récente aux ensembles culturels par lesquels nous nous rapportons à la Terre comme planète. L'historien Dipesh Chakrabarty a développé ce concept dans Chakrabarty, *op. cit.* in n. 3. La planéarité est analysée par Bonneuil, regroupant trois plans : écologies-mondes, réflexivités globales, et géopouvoirs. Christophe Bonneuil, Der Historiker und der Planet. Planetaritätsregimes an der Schnittstelle von Welt-Ökologien, ökologischen Reflexivitäten und Geo-Mächten, in *Gesellschaftstheorie im Anthropozän* (Frankfurt : Campus, 2021), 55-92. Voir également la majeure de la revue *Multitudes* consacrée à cette notion en 2019, pour une présentation : Ariel Kyrrou et Yves Citton, Planéarités en débats, *Multitudes*, 85/4 (2021), 67-73.

113 - Même si cela s'effectue dans un paradigme des savoirs de la Terre profondément différent de celui d'aujourd'hui.

temps géologiques aux temps humains – et de ses implications plus larges sur les régimes de réflexivité pour dresser l’anatomie d’une formation discursive de la seconde moitié du xix<sup>e</sup> jusqu’au xx<sup>e</sup> siècle qui au contraire thématise de façon régulière cette question. La préoccupation pour la place de l’humanité dans l’histoire de la Terre, et pour la marquer d’une séquence temporelle dédiée quelle que soit sa position hiérarchique, doit être considérée comme adhérente à l’histoire de la géologie comme discipline mais aussi à tout type de discours qui s’en nourrit durant cette période – fictions, documentaires, récits historiques, théories philosophiques et anthropologiques, etc.

En retour, une telle analyse participe à questionner les interprétations courantes des enjeux de l’Anthropocène, souvent considérés sous le prisme d’enjeux épistémiques et consistant à réunir histoires humaines et histoire de la Terre ou, plus largement, à dépasser la séparation entre nature et culture. D’une part, la surprise relative qu’a provoqué la notion d’Anthropocène pourrait être éclairée par une socio-histoire des sciences humaines et de la philosophie du xx<sup>e</sup> siècle tardif et du xxi<sup>e</sup> siècle, en informant la manière dont leurs cadres épistémiques ont rendu possible un tel étonnement. D’autre part, s’il est indéniablement stimulant et crucial de construire des perspectives et des savoirs pluridisciplinaires sur les enjeux écologiques globaux et ô combien menaçants, il paraît peu opportun d’en justifier la nécessité à l’aune de récits qui en ferait la réponse essentielle <sup>114</sup>.

114 - Dans la continuité des analyses de Fressoz : Jean-Baptiste Fressoz, L’Anthropocène et l’esthétique du sublime, *Mouvements* (2016), en ligne : <https://mouvements.info/sublime-anthropocene/>, consulté le 10/07/2023.

# Comment la mesure de la Terre par Ératosthène se révèle à la fois remarquablement exacte et terriblement imprécise

Jean-Marc Paturle \*

**Résumé :** La première question qui se pose avec la mesure de la Terre par le grec Ératosthène, au III<sup>e</sup> s. av. J.-C., est la longueur du stade qu'il utilisait. En s'appuyant sur des travaux généralement méconnus, l'auteur montre que la longueur de 158 m proposée dès 1802 par Girard, membre de l'expédition française en Égypte, et confirmée en 1972 par l'analyse de la *Géographie* de Strabon menée par le russe Firsov, doit être préférée à toutes les autres valeurs, et notamment celle de 185 m suggérée par Martin en 1854. Avec un stade de 158 m, les 252 000 stades obtenus par Ératosthène pour la circonférence de la Terre se trouvent à moins de 0,5 % de la réalité connue aujourd'hui. Cette exactitude remarquable, qui a donné lieu à une littérature abondante, a fait croire à une précision du même ordre. Mais l'exactitude n'est pas la précision. Les quatre approximations grossières qu'Ératosthène a été obligé d'effectuer, du fait des moyens techniques rudimentaires alors à sa disposition et de la méthode appliquée – deux approximations sur les distances et deux sur les angles – se sont presque parfaitement compensées deux à deux. Dès lors, l'auteur montre que la précision (ou plutôt l'imprécision !) de la mesure d'Ératosthène était, au contraire, de l'ordre de 20 à 25 %.

**Mots-clés :** stade d'Ératosthène ; Girard ; Firsov ; imprécision de la mesure d'Ératosthène.

**Summary:** *The first question that arises with the measurement of the Earth's circumference by the Greek Eratosthenes (3rd c. BC), is the length of the stade he used. Based on little known works, the author shows that the 158 m proposed in 1802 by Girard, a member of the French expedition to Egypt, and confirmed in 1972 by the analysis of Strabo's Geography conducted by the Russian Firsov, should be preferred over all other values, and particularly, the 185 m suggested by Martin in 1854. With a stade of 158 m, the 252,000 stades of Eratosthenes' measurement are less than 0,5% from today's known value. This remarkable accuracy, which has given rise to abundant literature, has*

\* Jean-Marc Paturle. Courriel : jmpaturle@gmail.com.

*led to belief in a precision of the same order. But accuracy is not precision. The four rough approximations that Eratosthenes was obliged to perform, given the rudimentary technical means then at his disposal and the method applied – two on distances and two on angles – almost compensated one another perfectly. Consequently, the author shows that the precision (or rather the imprecision!) of Eratosthenes' measurement was, on the contrary, rather of 20 to 25%.*

**Keywords:** *Eratosthenes' stade; Girard; Firsov; imprecision of Eratosthenes' measurement.*

## Introduction

On sait que plusieurs auteurs anciens ont rapporté que, au III<sup>e</sup> s. av. J.-C., Ératosthène avait mesuré la circonférence de la Terre et obtenu une valeur de 252 000 stades. Si l'on multiplie ce nombre par les 158 m que certains donnent à la longueur du stade qu'il utilisait, on obtient 39 816 km, un résultat très proche (0,5 %) des 40 008 km connus aujourd'hui<sup>1</sup>.

On s'est beaucoup extasié sur cette exactitude remarquable. Curieusement, personne ou presque n'a mis en évidence que, compte tenu des instruments de mesure de l'époque, il ne pouvait s'agir que d'une coïncidence. La mesure d'Ératosthène ne se trouve exacte que par hasard. L'examen attentif de la méthode employée par Ératosthène pour mesurer la circonférence de la Terre montre, au contraire, que la précision (ou plutôt l'imprécision!) de sa mesure est de l'ordre de 20 à 25 %.

Mais avant de l'exposer, il convient de revenir justement sur le sujet de la longueur du stade qu'utilisait Ératosthène. Ce point est l'objet d'une controverse qui agite les spécialistes depuis des siècles et qui n'est toujours pas tranchée. Pourtant, nous allons constater que nous avons depuis longtemps tous les éléments pour le faire.

<sup>1</sup> - Les grands cercles (constitués de deux méridiens), qui passent par les deux pôles, mesurent 40 008 km. Le cercle équatorial, du fait du léger renflement de la Terre, est un peu plus long : 40 075 km.

## Quelle est la longueur du stade d'Ératosthène ?

Cette question de la longueur en mètres des différents stades employés dans l'antiquité a longtemps été confuse et elle continue à faire débat aujourd'hui. Pourtant, de Pierre-Simon Girard<sup>2</sup> (1765-1836) à Lev V. Firsov<sup>3</sup> (1972), en passant par Antoine-Jean Letronne<sup>4</sup> (1787-1848) et Jacques-Frédéric Saigey<sup>5</sup> (1797-1871), les arguments se sont accumulés et permettent d'affirmer avec une grande probabilité que le stade d'Ératosthène mesure bien 158 mètres.

Pourquoi le débat n'est-il donc toujours pas clos<sup>6</sup> ? sans doute parce ces quatre auteurs n'ont pas été lus avec toute l'attention qu'ils méritent et, sans doute également, parce que la chronologie des événements n'a pas toujours été suffisamment respectée dans la relation qui en est faite. Essayons d'y remédier.

### Le stade olympique (190 m environ)

Au départ, le stade était une mesure de longueur grecque. Il était composé de 600 pieds.

Si chaque cité ou presque avait son stade, dont les longueurs

2 - Pierre-Simon Girard, « Mémoire sur le nilomètre de l'île Éléphantine et les mesures égyptiennes », lu en 1802 « à la première classe de l'Institut », publié en 1809 dans la 1<sup>re</sup> éd. de la *Description de l'Égypte ou recueil des observations et des recherches qui ont été faites en Égypte pendant l'expédition de l'armée française, publié par les ordres de sa majesté l'empereur Napoléon le Grand*, « Antiquités, mémoires I » (Paris : Imprimerie impériale, 1809), 1-47, et publié à nouveau dans la 2<sup>de</sup> éd., dite édition Panckoucke, vol. 6 (Paris : Panckoucke, 1822), 1-96. Les extraits cités ici sont tirés de cette 2<sup>de</sup> éd.

3 - Lev V. Firsov, Eratosthenes' calculation of the Earth's circumference and the length of the Hellenistic stade, *Journal of ancient history*, 121/3 (1972), 154-174.

4 - Antoine-Jean Letronne, *Recherches critiques, historiques et géographiques sur les fragments d'Héron d'Alexandrie, ou du système métrique égyptien considéré dans ses bases, dans ses rapports avec les mesures itinéraires des Grecs et des Romains, et dans les modifications qu'il a subies depuis le règne des pharaons jusqu'à l'invasion des Arabes* (Paris : Imprimerie nationale, 1851). Ce mémoire a été rédigé par Letronne en réponse à une question mise au concours par l'Académie des inscriptions et belles-lettres. Bien que couronné en 1816 par l'Académie, il ne sera publié qu'en 1851 par Alexandre-Joseph-Hidulphe Vincent (1797-1868).

5 - Jacques-Frédéric Saigey, *Traité de métrologie ancienne et moderne* (Paris, 1834).

6 - Voir notamment Donald Engels, The length of Eratosthenes' stade, *The American journal of philology*, 106/3 (1985), 298-311, et, encore récemment, Dmitry A. Shcheglov, The so-called « itinerary stade » and the accuracy of Eratosthenes' measurement of the Earth, *Klio*, 100/1 (2018), 153-177.

pouvaient varier légèrement, celle du stade olympique s'est rapidement imposée comme référence, du fait de l'importance des jeux olympiques auxquels participaient, tous les quatre ans, l'ensemble des cités grecques. La construction du stade d'Olympie remonte à la plus haute antiquité (VIII<sup>e</sup> s. av. J.-C.). Les archéologues qui l'ont mesuré lui ont trouvé une longueur d'environ 190 mètres, sans pouvoir être plus précis du fait de ses remaniements successifs.

Ayant été construit (comme tous les stades grecs) en mesurant 600 pieds, le pied olympique faisait donc près de 32 cm. Il ne faut pas s'étonner d'une telle pointure (49 et demi!), car la tradition l'attribuait au pied d'Hercule. C'est ce qui ressort d'une anecdote rapportée par Plutarque, citée par Aulu-Gelle (II<sup>e</sup> s. ap. J.-C.) :

« Plutarque [...] dit que le philosophe Pythagore s'est servi d'un raisonnement très subtil et très ingénieux pour déterminer la taille du grand [Hercule] ; car comme il passait à peu près pour constant que le héros, ayant mesuré le stade des jeux établis à [Olympie], près du temple de Jupiter Olympien, trouva qu'il avait six cents de ses pieds, et que les autres stades que l'on créa ensuite en Grèce étaient pareillement de six cents pieds, mais un peu moins étendus que ceux [d'Olympie], ce philosophe comprit facilement que, d'après les règles des proportions, on pouvait établir entre la mesure du pied d'Hercule et celle du pied ordinaire, la même différence qui se trouvait entre les dimensions du stade olympien et celles des autres stades de la Grèce<sup>7</sup>. »

Ce stade olympique était celui qu'utilisait notamment Aristote (IV<sup>e</sup> s. av. J.-C.) lorsqu'il avait rapporté une mesure de la Terre de 400 000 stades qu'il disait avoir été calculée par des « mathématiciens », sans qu'il ait précisé lesquels<sup>8</sup>. Ces 400 000 stades faisaient donc presque le double de la circonférence réelle de la Terre.

7 - Aulu-Gelle, *Les Nuits attiques*, livre I, ch. I (trad. Victor Verger [Paris : F. I. Fournier, 1820], 15-17, voir aussi note p. 130 pour l'identification entre la ville de Pisé et Olympie).

8 - Aristote, *Du ciel*, B, 14, 298 a.



## **Le stade égyptien (158 m)**

Sous les pharaons, le système de mesure linéaire égyptien était basé sur la « coudée royale », avec ses subdivisions et ses multiples. Cette coudée servait à mesurer tout ce qui avait un but d'utilité publique, et particulièrement le niveau du Nil, dont on sait toute l'importance qu'il avait pour l'Égypte. Chaque année, lors de la crue (de juin à septembre), l'accroissement du niveau du fleuve était publiquement et régulièrement annoncé en coudées.

Lorsqu'Hérodote, qui visita l'Égypte au <sup>v</sup><sup>e</sup> s. av. J.-C., rapporte ce que « les prêtres [lui] racontèrent de ce pays », la référence est le nombre de coudées : « Si le fleuve ne monte pas de seize coudées, ou au moins de quinze, il ne se répand point sur les terres. » Il dit encore : « Le Nil, s'étant débordé en ce temps-là de dix-huit coudées, [avait] submergé toutes les campagnes <sup>9</sup>. »

Des étalons de cette « coudée royale » étaient précieusement conservés dans les temples et confiés à la garde des prêtres. Selon Champollion-Figeac <sup>10</sup>, d'autres étaient déposés dans les tombeaux. Plusieurs ont été retrouvés, notamment dans les ruines de Memphis, et sont conservés aujourd'hui dans les musées de Paris ou Turin. Leurs longueurs variant de 523,5 mm à 527 mm, Saigey (1834) a proposé de retenir une moyenne de 525 mm pour la coudée royale <sup>11</sup>. Cette valeur de 525 mm a été récemment (2013) confirmée par Hirsch <sup>12</sup>.

Avec sa victoire d'Issos (333 av. J.-C.), Alexandre le Grand s'ouvre le chemin de l'Égypte ; celle-ci était sous domination perse depuis deux siècles. Alexandre est accueilli en libérateur. À sa mort, dix ans plus tard, ses généraux se partagent son empire : l'Égypte échoit aux Ptolémées. Contrairement aux Perses, dont la poli-

9 - Hérodote, *Histoires*, II 13 et II 111 (trad. Larcher [Paris : Charpentier, 1850], t. 1, 139 et 191).

10 - Jacques-Joseph Champollion (1778-1867), dit Champollion-Figeac, Supplément aux observations sur les coudées égyptiennes découvertes dans les ruines de Memphis, *Bulletin universel des sciences et de l'industrie*, VII<sup>e</sup> section, 25/2 (1824), 1-4. Champollion-Figeac était le frère aîné de Jean-François Champollion (1790-1832), dit Champollion le Jeune, le déchiffreur des hiéroglyphes.

11 - Saigey, *op. cit.* in n. 5, 17.

12 - Antoine-Pierre Hirsch, « Ancient Egyptian cubits : Origin and evolution », thèse de doctorat, université de Toronto (2013), 50.

tique brutale, notamment sur le plan religieux, avait suscité de nombreuses révoltes, les Grecs ont à cœur de respecter les traditions d'une civilisation égyptienne bien plus ancienne et tout aussi brillante que la leur. En particulier, les Ptolémées maintiennent soigneusement le système de mesure égyptien.

Girard le confirme : « Les Grecs, qui firent la conquête de l'Égypte, y trouvèrent établi un système métrique. Soit qu'ils attachassent peu d'importance à substituer leurs propres mesures à celles des Égyptiens, soit qu'ils regardassent cette substitution comme impraticable chez un peuple religieusement attaché au maintien de ses anciennes habitudes, il ne paraît pas que les Ptolémées aient essayé de lui faire adopter l'usage des mesures grecques. Ainsi le peuple conquis continua d'employer les mesures dont il connaissait de temps immémorial la grandeur absolue<sup>13</sup>. »

Letronne le dit aussi : « L'analyse de la géographie d'Hérodote a démontré que les Ptolémées ne changèrent point le système métrique de l'Égypte. [...] Les Ptolémées ont eu constamment pour système de n'introduire aucune innovation dans le pays que le sort des armes les appelait à gouverner. [...] Pour n'en rapporter qu'un exemple, je citerai le calendrier, auquel les Ptolémées ne changèrent absolument rien, puisqu'ils conservèrent outre la forme de l'année solaire, tous les mois égyptiens avec leurs dénominations primitives<sup>14</sup>. »

Une preuve tangible de la permanence du système de mesure linéaire entre l'Égypte ancienne et celle des Ptolémées (au moins des premiers Ptolémées) se trouve dans le nilomètre de l'île Éléphantine (île située à la hauteur de Syène, l'ancien nom d'Assouan). Ce nilomètre, en effet, comme l'a montré Letronne<sup>15</sup>, a été construit sous les premiers Ptolémées. Or, l'échelle gravée dans la pierre qui servait à mesurer le niveau du fleuve était constituée de sept unités de 527 mm de hauteur chacune, c'est-à-dire, à 2 mm près, la longueur moyenne retenue par Saigey pour la « coudée royale ».

Un des éléments qui ont permis la datation du nilomètre est que

13 - Girard, *op. cit.* in n. 2, 34.

14 - Letronne, *op. cit.* in n. 4, 209-211.

15 - Letronne, *op. cit.* in n. 4, 114.

ses coudées étaient numérotées dans les deux langues, grecque et égyptienne. L'ingénieur des Ponts-et-Chaussées, Pierre-Simon Girard, l'un des 167 scientifiques qui accompagnaient l'expédition de Bonaparte en Égypte, et qui a redécouvert le nilomètre en juillet 1799 en le dégagant des décombres sous lesquels il était enfoui depuis des siècles, l'avait scrupuleusement noté :

« On voit encore, gravés à l'extrémité de quelques-unes des coudées, les caractères numériques grecs servant à marquer le rang qu'elles occupaient entre les plus hautes et les plus basses eaux. La première, en commençant par la plus haute, est marquée du nombre ΚΔ [24]; la seconde est indiquée par ΚΓ [23]; les nombres des deux coudées suivantes sont effacés; la cinquième est marquée du nombre Κ [20].

« Outre ces caractères numériques tracés en lettres majuscules, on voit encore, vis-à-vis des deux premières coudées seulement, d'autres caractères plus petits, qui probablement servaient à exprimer les mêmes nombres dans l'ancienne écriture égyptienne<sup>16</sup>. »

Cependant, la permanence du système de mesure égyptien souffrit une légère entorse. En effet, selon un processus bien observé par ailleurs, la langue grecque s'imposant progressivement dans l'élite, certaines unités de mesure égyptiennes, tout en conservant leur dimension, changèrent d'appellation. Ce fut le cas de la demi-coudée royale qui, étant l'unité dont la longueur était la plus proche de celle du pied grec, fut traduite en grec par « pied ». Mais il s'agissait d'un « pied égyptien ». Dès lors, on considéra que 600 pieds égyptiens, c'est-à-dire 300 coudées royales, faisaient un « stade égyptien ».

Ératosthène, qui est arrivé à Alexandrie à l'appel de Ptolémée III Évergète vers 244 av. J.-C. et y est mort vers 193 av. J.-C. sous Ptolémée V Épiphane<sup>17</sup>, utilisait donc ce « stade égyptien » de 300 coudées royales. Ainsi, en multipliant par 300 les 527 mm qu'il avait trouvés pour la coudée royale à Éléphantine, Girard pouvait conclure dès 1802, dans le rapport qu'il présenta à

16 - Girard, *op. cit.* in n. 2, 6.

17 - Voir Richard Goulet (dir.), *Dictionnaire des philosophes antiques*, t. III (CNRS Éditions, 2000), p. 199 pour la date d'arrivée à Alexandrie, et p. 192 pour la date de décès d'Ératosthène.

son retour d'Égypte : « Le stade d'Ératosthène [est] donc de 158,1 m<sup>18</sup>. »

### Confirmation par Letronne

En 1816, Letronne apporta un argument supplémentaire à l'appui de la thèse proposée par Girard selon laquelle le stade utilisé par Ératosthène valait 300 coudées royales. Letronne s'appuyait sur un passage de Pline (XII, 30) selon lequel : « Le schœne, au rapport d'Ératosthène, contient 40 stades<sup>19</sup>. »

Or, le schœne était une unité de mesure citée dans les fragments d'Héron d'Alexandrie, dont l'examen était justement l'objet du mémoire de Letronne et pour lequel il recevra le premier prix de l'Académie. Le schœne y était indiqué valoir 12 000 coudées royales<sup>20</sup>. Letronne en déduisit que le stade d'Ératosthène valait bien  $12\,000/40 = 300$  coudées royales.

### Le stade de « huit au mille » (185 m)

Avant d'être conquis par les Romains, les Grecs ne connaissaient pas le mille. Le mille est d'abord une mesure romaine (comme le stade est d'abord une mesure grecque). Le mille romain est égal à 1 000 *passus*. Le *passus*, parfois traduit par « pas double », s'oppose au *gradus* qui fait la moitié d'un *passus*<sup>21</sup>. La valeur du

18 - Girard, *op. cit. in n. 2*, 67. Quatre-vingts ans après Girard, en se basant sur les 525 mm que Saigey avait proposé de retenir pour la coudée royale, Hultsch obtiendra (en faisant, comme Girard, la multiplication par 300) 157,5 m (Friedrich Hultsch, *Griechische und Römische Metrologie* [Berlin : Weidmann, 2<sup>e</sup> éd., 1882], § 9, 4 p. 61). C'est cette valeur de 157,5 m qui est souvent retenue aujourd'hui pour le stade d'Ératosthène. En réalité, celle-ci n'est pas correcte. En effet, la longueur de la coudée royale n'est pas connue avec une telle précision du mm. Les 525 mm ne sont qu'une moyenne : pour Saigey (*op. cit. in n. 5*, 17), de sept valeurs situées entre 523,5 et 527 mm, et pour Hirsch (*op. cit. in n. 12*, 50), de valeurs qui varient de 521 à 529 mm. En conséquence, il est erroné de donner un quatrième chiffre significatif au stade d'Ératosthène. Il faut absolument l'arrondir soit à 158 m, soit à 157 m. Nous proposons ici de retenir la valeur de 158 m : valeur qui, ironiquement, a l'avantage d'utiliser les mêmes chiffres que sa concurrente à 185 m, dont nous parlons plus loin !

19 - Pline, *Histoire naturelle*, livre XII, ch. xxx (trad. Ajasson de Grandsagne [Paris : Panckoucke, 1829-1833], t. 8, 337).

20 - Letronne, *op. cit. in n. 4*, 81.

21 - Le *gradus* (qui correspond à notre pas) était la distance (en marchant) entre la marque d'un pied sur le sol et celle de l'autre pied. Le *passus* (pas double) était la distance entre la marque d'un pied et celle du même pied.

mille romain est assez bien connue du fait que les voies romaines étaient balisées de bornes milliaires, dont certaines ont été retrouvées. Sa valeur est généralement arrondie à 1 480 mètres.

La conquête de la Grèce par les Romains eut lieu au cours du II<sup>e</sup> s. av. J.-C. Pour faciliter la conversion d'un système à l'autre, les Romains eurent besoin d'établir une concordance simple entre leur mille et le stade. Du fait que l'Égypte ne sera conquise que beaucoup plus tard (en 30 av. J.-C., à la mort de Cléopâtre, mère de Ptolémée XV, le dernier des Ptolémées), le choix se porta naturellement sur le stade olympique.

Or, celui-ci se trouvait correspondre à peu près à un huitième du mille. Dès lors, ce rapport de  $\frac{1}{8}$  sera définitivement fixé et le stade olympique, qui, on l'a vu, tournait autour des 190 m, verra ainsi sa longueur légèrement réduite et arrêtée à 185 m. Ce nouveau rapport de « un mille romain pour huit stades » nous est confirmé :

- par Polybe, l'historien grec (II<sup>e</sup> s. av. J.-C.), qui, décrivant la route suivie par Hannibal pour aller en Italie, ajoute : « Ces lieux se trouvent maintenant soigneusement arpentés et jalonnés de bornes, tous les huit stades, par les Romains<sup>22</sup>. »
- par Strabon, le géographe grec : « D'Apollonia part vers l'est en direction de la Macédoine la Voie Egnatienne. Elle est mesurée en milles et pourvue de bornes jusqu'à Kypséla et le cours de l'Hèbre. Le total fait 535 milles. En comptant, comme on fait le plus souvent, *le mille pour huit stades*, on aurait 4 280 stades<sup>23</sup>. »

Il est important de noter que ce stade de « huit au mille » n'apparaît que bien après la mort d'Ératosthène. Ce n'est qu'à partir de l'époque de Caius Gracchus (donc vers 125 av. J.-C.) qu'on a

22 - Polybe, *Histoires*, livre III, 39.8 (trad. Éric Foulon [Paris : Les Belles Lettres, 2004], p. 52). La datation de ce passage est probablement même encore plus tardive car selon Hultsch, il s'agit sans doute d'un ajout fait plus tard au texte de Polybe (Hultsch, *op. cit.* in n. 18, p. 65, note 2).

23 - Strabon, *Géographie*, VII, 7, 4. Sauf mention explicite du contraire (en particulier pour les livres XIV et XVI), nous utilisons dans cet article la traduction de la *Géographie* de Strabon parue aux Belles Lettres (Paris : Les Belles Lettres, 1966-2016), ici t. IV, trad. Raoul Baladié (1989), 136.

commencé à « placer des bornes milliaires sur les voies romaines dans des contrées grecques ou soumises depuis longtemps à l'influence grecque <sup>24</sup> ».

**Les deux stades :  
le stade court (158 m) et le stade long (185 m)**

Un des premiers à contester la valeur de 158 m pour le stade d'Ératosthène est Thomas-Henri Martin (1813-1884). Pour ce dernier, il est impossible que deux stades différents, l'olympique et l'égyptien, aient été utilisés ensemble par la communauté scientifique grecque : « [Sinon] Archimède, Ératosthène, Hipparque, Posidonius, Strabon, Vitruve, Pline, Ptolémée et autres n'auraient pas manqué de définir le stade employé dans les mesures de la Terre trouvées, adoptées ou citées par eux. [...] Il est évident que pour tous ces auteurs il n'y a qu'un stade. Or, quelques-uns (comme Strabon, Vitruve et Pline) se trouvent le définir par comparaison avec le mille romain : leur stade est l'ancien stade grec contenu 8 fois dans ce mille <sup>25</sup> », c'est-à-dire le stade de 185 m.

Cette remarque de Martin ignore que Strabon, Vitruve et Pline écrivent plus de deux siècles après Ératosthène. Entre temps, l'information sur l'existence de deux stades différents a pu être perdue. De plus, contrairement à Ératosthène ou Hipparque, Strabon n'est pas un mathématicien. On peut donc penser que la division par huit (en numération alphabétique grecque) devait se trouver à la limite de ses capacités de calcul.

Quoi qu'il en soit, à partir de Martin, il va progressivement se créer, chez les commentateurs modernes d'Ératosthène, deux groupes <sup>26</sup> qu'on baptisera les partisans d'un stade court (158 m) et ceux d'un stade long (185 m).

24 - Thomas-Henri Martin, *Examen d'un mémoire posthume de M. Letronne* (Paris, 1854), 33.

25 - Martin, *op. cit.* in n. 24, 67.

26 - Voir notamment Shcheglov, *op. cit.* in n. 6, 155.

### **Confirmation par Firsov de la thèse du « stade court »**

En 1972, en s'appuyant sur 84 itinéraires donnés par Strabon dans sa *Géographie*, Firsov va nettement confirmer la thèse de Girard et de Letronne. Curieusement, cette confirmation passera largement inaperçue<sup>27</sup>.

C'est en effet à Strabon qu'on doit pratiquement tout ce qu'on sait de la géographie d'Ératosthène. L'idée de Firsov a donc été de rechercher dans l'ouvrage de Strabon des itinéraires dont les distances étaient indiquées en stades par Ératosthène et de tenter d'en trouver la distance réelle en km. La comparaison entre les deux distances devrait permettre de décider lequel des deux stades, court ou long, Ératosthène utilisait.

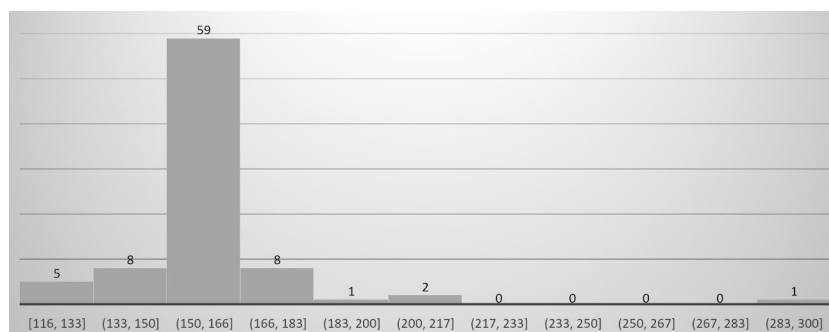
L'article de Firsov retient 84 itinéraires<sup>28</sup> (voir la liste en annexe). Ces itinéraires sont de longueurs très variées (de 100 à 14 000 stades), ils sont maritimes ou terrestres, et se situent surtout dans les régions les mieux connues des Hellènes, à savoir la mer Méditerranée elle-même, ses rives sud et est, l'Italie, Chypre et le Péloponnèse ainsi que le Pont-Euxin (mer Noire). Pour chaque itinéraire, Firsov divise la distance en km (telle qu'elle est connue aujourd'hui) par la distance en stades (indiquée par Strabon). Il trouve ainsi 84 quotients, chacun de ces quotients correspondant donc à une longueur du stade.

La distribution de ces 84 valeurs est présentée dans l'histogramme de la fig. 1. L'examen de cet histogramme permet de faire les remarques suivantes :

- 59 valeurs sur 84 (70 %) se situent entre 150 et 166 mètres;
- 1 valeur (celle de 300 m) est manifestement aberrante;
- 8 valeurs (10 %) se situent juste à gauche (133-150 m) et 8 autres valeurs (10 %) juste à droite (166-183 m) de la colonne centrale;

27 - Peut-être parce que l'article de Firsov, à part son résumé en anglais, n'est disponible qu'en russe...

28 - Firsov en annonce 85 (Firsov, *op. cit.* in n. 3, 165). Cependant, comme dans sa liste, l'itinéraire Byzance – bouches du Borysthène (3 800 stades) se retrouve deux fois, Firsov ne le compte qu'une seule fois dans le calcul de ses moyennes.



**Figure 1**  
*Distribution des 84 valeurs de stade obtenues par Firsov (1972)*

- Les 8 dernières valeurs (10 %) se répartissent un peu plus loin à gauche (116-133 m) ou à droite (183-217 m).

De ces remarques, on peut tirer plusieurs conclusions :

- Si l'on exclut la valeur aberrante de 300 m<sup>29</sup>, les 83 valeurs restantes sont distribuées de façon quasi-normale (au sens statistique du terme), ce qui prouve qu'il n'y a pas de biais statistique dans l'échantillon retenu par Firsov<sup>30</sup>. Cette distribution quasi-normale justifie donc le calcul d'une moyenne et d'un écart-type;
- La moyenne des 83 valeurs (156,2 m) valide clairement un stade d'Ératosthène court (158 m), au détriment du stade long (185 m);

29 - À l'examiner de plus près, il apparaît en effet que cette valeur de 300 m est vraisemblablement le résultat d'une erreur de copie, comme il en survient fréquemment dans les manuscrits anciens, en particulier dans les chiffres. En effet, elle résulte du 5<sup>e</sup> itinéraire retenu par Firsov (voir liste en annexe), « cap Pachynos (pointe sud-est de la Sicile) – Détroit de Sicile ». Suivant Strabon (II, 4, 3) (*op. cit. in n. 23, t. I/2, 73*), Firsov l'a retenu pour 1 000 stades. Strabon ne dit pas où il situe précisément ce qu'il appelle « Détroit de Sicile » ; cependant, ce dernier doit forcément se situer au-delà (à l'ouest) de la pointe nord-ouest de la Sicile. Or, dans un autre passage (VI, 2, 1), Strabon indique 1 550 stades (4 400 moins 1 720 et moins 1 130) pour la distance entre les deux pointes sud-est et nord-ouest de la Sicile (*op. cit. in n. 23, t. III, 150*). Il est donc probable qu'il faut lire « 2 000 stades » (au lieu de 1 000 stades) pour ce 5<sup>e</sup> itinéraire « cap Pachynus – Détroit de Sicile », ce qui aurait conduit à un stade de 150 m (au lieu de 300 m).

30 - Ce qui prouve aussi que la critique d'Engels, selon laquelle Firsov aurait fait « une moyenne entre des géants et des pygmées et obtenu une taille normale » (Engels, *op. cit. in n. 6, 307*), est complètement erronée.



### *Comment la mesure de la Terre par Ératosthène...*

- L'écart-type des 83 valeurs (14,3 m), relativement important (9,2 %), est caractéristique de l'imprécision des mesures de distances, inhérente à cette époque.

Certes, ces 84 valeurs ne sont qu'un échantillon : celui qui a été retenu par Firsov. D'autres échantillons sont évidemment possibles tant l'ouvrage de Strabon est riche de très nombreuses distances indiquées en stades. C'est ainsi que Dmitry Shcheglov<sup>31</sup> a construit un échantillon constitué de 295 distances trouvées chez Strabon. Sans surprise, Shcheglov arrive à un résultat identique à celui de Firsov<sup>32</sup>.

### **Ne pas confondre exactitude et précision**

Une des raisons qui conduisent certains commentateurs modernes à contester la valeur de 158 m (ou approchée) pour le stade d'Ératosthène est que cette valeur, multipliée par 252 000, donne, pour la circonférence de la Terre, un résultat très (trop!) proche de la réalité : on s'est élevé contre cette «précision étonnante, inexplicable et incroyable, étant donné les moyens et les données dont [Ératosthène] pouvait disposer<sup>33</sup>», et on s'est interrogé sur cette «étonnante coïncidence<sup>34</sup>».

Encore récemment, en 2018, Shcheglov va même plus loin dans le soupçon et dénonce un *circulus vitiosus* : selon lui, les 158 m ne seraient retenus que pour obtenir le résultat connu aujourd'hui, et il conclut : «Après tout, je ne vois pas d'autre explication à l'extraordinaire popularité de l'hypothèse du stade court qu'une

31 - Shcheglov, *op. cit.* in n. 6, 160-170.

32 - Curieusement pourtant, Shcheglov vient ensuite corriger ses résultats (qui validaient le «stade court») en affirmant que les anciens surestimaient systématiquement les distances, ce qui lui permet ainsi de valider le «stade long». Shcheglov prétend démontrer cette surestimation systématique en procédant à une analyse statistique de distances données par les anciens en milles romains (dont on connaît la longueur). Pour comprendre comment cette analyse de Shcheglov est erronée, voir le récent article très détaillé d'Irina Tupikova qui, au terme d'un chapitre éloquent intitulé *Pitfalls of statistics*, écrit : « Nous concluons que l'affirmation de Shcheglov d'une surestimation moyenne des distances romaines de 25 à 30 % n'est pas valide. » Tupikova, A common-sense approach to the problem of the itinerary stadion, *Archive for history of exact sciences*, 76 (2022), 319-361, 343.

33 - A. Ruiz Cadalso, La véritable valeur du stade d'Ératosthène et des dimensions de la Terre déduites par lui, *Bulletin géodésique*, 58 (1938), 148-157, 149.

34 - Engels, *op. cit.* in n. 6, 303.

simple tentation de saluer la mesure de la Terre par Ératosthène comme un triomphe du génie scientifique grec<sup>35</sup>. »

Tous ces auteurs semblent confondre exactitude et précision. Ce n'est pas parce que le stade d'Ératosthène est de 158 m que sa mesure en est plus précise pour autant. Elle ne se trouve exacte que par hasard. Il n'y a là rien qui soit « inexplicable » ou « incroyable » ! Comme nous allons le voir, cette apparente précision est le résultat de plusieurs approximations grossières qui ont eu la chance de se compenser presque parfaitement.

## Les quatre approximations d'Ératosthène

Tous les auteurs anciens qui ont rapporté la mesure de la circonférence de la Terre par Ératosthène – d'Hipparque à Martianus Capella en passant par Strabon, Vitruve, Pline, Censorin ou Macrobe<sup>36</sup> – indiquent la valeur de 252 000 stades. Le seul qui fasse

35 - Shcheglov, *op. cit.* in n. 6, 172. L'accusation de *circulus vitiosus* peut évidemment lui être aisément retournée (voir plus haut n. 32) !

36 - Strabon (II, 5) écrit au § 7 : « L'équateur [vaut], d'après Ératosthène, 252 000 stades de tour », puis au § 34 : « Hipparque [adopte] comme dimension de la circonférence terrestre le chiffre de 252 000 stades transmis par Ératosthène. » Strabon, *op. cit.* in n. 23, t. I, 2<sup>e</sup> part., 86 et 118. En revanche, plus haut (I, 4, 1), le même Strabon avait écrit : « Ce qu'[Ératosthène] dit de la grandeur de la Terre est contesté par les géographes venus après lui, et la mesure qu'il en a donnée n'a pas été généralement ratifiée » (dans la traduction d'Amédée Tardieu [Paris : Hachette, 1867-1890], t. I, 106), sans que ces *géographes venus après lui* soient précisés (sinon que Hipparque n'en fait pas partie). Vitruve (I<sup>er</sup> s. av. J.-C.), un contemporain de Strabon, écrit : « Ératosthène le Cyrénéen a trouvé, avec le secours des mathématiques et de la géométrie, que la circonférence de la Terre est de 252 000 stades. » *L'Architecture de Vitruve*, livre I, ch. vi (trad. C.-L. Maufras [Paris : Panckoucke, 1847], t. 1, 79). Pline (23-79 ap. J.-C.) écrit : « Quant à la circonférence totale, Ératosthène, savant universel et surtout profond géomètre (car tous l'admirent sur ce point), la fait monter à 252 000 stades. [...] Calculs téméraires, mais basés sur des arguments si exacts, que l'on rougirait d'en douter. » Pline, *Histoire naturelle*, livre II, ch. cxii (trad. Grandsagne, *op. cit.* in n. 19, t. 2, 231). Les autres auteurs anciens qui rapportent la mesure d'Ératosthène, Censorin (III<sup>e</sup> s.) (*De die natali*, ch. 13), Macrobie (IV<sup>e</sup> s.) (*Commentarium in Somnium Scipionis*, livre II, ch. 6) et Martianus-Capella (V<sup>e</sup> s.) (*De nuptiis Philologiae et Mercurii*, livre VI, ch. 1) – références indiquées par Girard (*op. cit.* in n. 2, 32) – sont nettement plus tardifs. Quant à Claude Ptolémée (II<sup>e</sup> s. ap. J.-C.), qui connaissait sûrement la mesure d'Ératosthène, notons quand même que, selon Letronne, le grand astronome « n'en fait mention ni dans l'*Almageste*, ni dans la *Géographie*, alors qu'au chapitre III de ses *Prolégomènes*, il traite de la mesure de la Terre. » (Letronne, *Mémoire sur cette question : Les anciens ont-ils exécuté une mesure de la Terre postérieurement à l'établissement de l'école d'Alexandrie ? Mémoires de l'Institut royal de France*, année 1822, t. 6, 261-323, 281).

### *Comment la mesure de la Terre par Ératosthène...*

exception est Cléomède qui lui donne 250 000 stades. Mais cette dernière valeur est difficile à écarter car Cléomède est également le seul qui nous donne la méthode suivie par Ératosthène pour réaliser sa mesure.

On a beaucoup écrit sur cette différence de 2 000 stades, sans doute bien vainement car – comme nous le verrons plus loin – l'explication la plus simple (la recherche d'un nombre arrondi) devrait s'imposer d'elle-même.

Cléomède est un philosophe stoïcien grec qui ne nous est connu que par le seul ouvrage qui nous est resté de lui, sa « Théorie des mouvements circulaires des corps célestes ». Même ses dates sont incertaines. Comme il cite un autre philosophe stoïcien, Posidonius (135-50 av. J.-C.) et qu'il ne cite pas Claude Ptolémée (II<sup>e</sup> s. ap. J.-C.), certains situent Cléomède au I<sup>er</sup> siècle ap. J.-C. D'autres, compte tenu de son style, suggèrent le II<sup>e</sup> siècle. Rien n'est donc sûr.

Son ch. x, intitulé « Sur la grandeur de la Terre », est entièrement consacré à l'exposé de deux méthodes de mesure de la Terre, une de Posidonius et l'autre d'Ératosthène<sup>37</sup>. Pour analyser la méthode d'Ératosthène, nous nous baserons donc sur ce qu'a écrit Cléomède, qui est notre seule source sur le sujet<sup>38</sup>.

D'après Cléomède, la méthode qu'Ératosthène a utilisée pour obtenir 250 000 stades (méthode si bien connue qu'il n'est certainement pas nécessaire de la rappeler ici) l'a obligé à faire quatre hypothèses qui, comme nous allons le voir, sont autant d'approximations grossières. En effet :

37 - Cléomède, *De motu circulari corporum caelestium*, I, x, § 3 à 5 (trad. Richard Goulet [Paris : Vrin, 1980], 123-125). La « méthode d'Ératosthène » proprement dite n'occupe qu'un peu plus de deux pages.

38 - Une telle affirmation devrait aller sans dire, puisque Cléomède est notre seule source. Elle est pourtant nécessaire car de nombreux commentateurs modernes, sous les prétextes les plus variés, et parfois même sans prétexte (!), se sont affranchis du texte de Cléomède. Dès lors, laissant libre cours à leur imagination, ils ont pu tout écrire, et souvent n'importe quoi !

### **Syène et Alexandrie ne sont pas situées sous le même méridien**

Selon Cléomède, il s'agit pourtant du premier « présumé » fait par Ératosthène : « Supposons tout d'abord [...] que Syène et Alexandrie sont situées sous le même méridien », écrit Cléomède en débutant son exposé de la méthode d'Ératosthène.

Or, l'écart de longitude entre les deux villes est presque de 3°. Cela entraîne une erreur de 6,2 %<sup>39</sup>.

Ératosthène, à son époque, n'avait absolument aucun moyen de mesurer un écart de longitude aussi faible.

La question peut éventuellement se poser pour le siècle suivant, avec Hipparque. L'historien allemand, Oskar Viedebant (1883-1945) était ainsi convaincu qu'Hipparque avait observé (ou fait observer), à Alexandrie et Syène, des différences d'heure de début ou de fin d'une même éclipse<sup>40</sup>. Viedebant se basait sur un passage de Strabon (I, 1, 12) dans lequel on peut lire : « Hipparque notamment, dans sa Critique de la Géographie d'Ératosthène, fait remarquer très judicieusement que la connaissance de la géographie, si utile à la fois au simple particulier et à l'érudit de profession, ne saurait absolument s'acquérir sans quelques notions préliminaires d'astronomie et sans la pratique des règles du calcul des éclipses. [...] Comment savoir exactement si tel pays est plus avancé vers l'orient et tel autre vers l'occident, autrement que par la comparaison des éclipses du Soleil et de celle de la Lune<sup>41</sup> ? »

Peut-être, en effet, Hipparque était-il capable de différencier les

39 - La distance à vol d'oiseau entre Alexandrie et Assouan est de 843 km, alors que la distance entre leurs deux parallèles n'est que de 791 km, soit une différence de 6,2 %. Sur ce point, Geus calcule une erreur de 0,15 % seulement. Il s'agit évidemment d'une énorme bévue de sa part ! Il confond l'angle de 3° au centre de la Terre (qui est, en effet, la différence de longitude) avec un même angle à la surface de la Terre (Klaus Geus, *Eratosthenes von Kyrene : Studien zur hellenistischen Kultur- und Wissenschaftsgeschichte* [München, 2002], 233-234, fig. 6).

40 - *Daß Hipparch sich die Unterlage für die Bestimmung des Unterschiedes im Eintritt der Verfinsterungen für Alexandria und Syene durch Beobachtung an Ort und Stelle unschwer hat verschaffen können, dürfen und müssen wir annehmen*. Viedebant O., *Eratosthenes, Hipparchos, Poseidonos: Ein Beitrag zur Geschichte des Erdmessungsproblems im Altertum*, *Klio*, 14 (1915), 207-256, p. 217.

41 - *Géographie de Strabon*, trad. Amédée Tardieu (Paris : Hachette, 1867-1890), t. 1, 11.

longitudes? En revanche, au siècle précédent, celui d'Ératosthène, il n'en a jamais été question. D'ailleurs, ce passage de Strabon le confirme bien.

Par conséquent, Ératosthène devait se contenter d'observer que la vallée du Nil était orientée globalement sud-nord; il ne pouvait pas être plus précis. Compte tenu du coude important que forme le Nil au niveau de Thèbes (actuelle Louxor), et un autre au nord de Lycos (actuelle Assiout), il est probable qu'Ératosthène lui-même devait être bien conscient du caractère approximatif d'une telle observation.

Cependant, l'hypothèse d'une similitude de méridien était la seule qu'il lui était matériellement possible de faire.

### **La distance entre Syène et Alexandrie n'est pas de 5 000 stades**

Toujours selon Cléomède, il s'agit du deuxième « présupposé » fait par Ératosthène : « La distance entre les deux villes [Syène et Alexandrie] est de 5 000 stades. »

On ne sait absolument pas comment Ératosthène a élaboré ce deuxième « présupposé » : ni Cléomède, ni personne n'en parle. Comme le note justement Edme-François Jomard (1777-1862) : « Aucun auteur ne rapporte qu'il [Ératosthène] ait fait ou dirigé une mesure immédiate sur le terrain, égale à 5 000 stades de longueur, ni qu'il se soit transporté à Syène <sup>42</sup>. »

On sait seulement, et on le ressasse, que Martianus Capella (v<sup>e</sup> s. ap. J.-C.) a écrit que, pour évaluer la distance de Syène à Méroé, Ératosthène a retenu le nombre de stades donné par les « arpenteurs royaux de Ptolémée » (*per mensores regios Ptolemaei* <sup>43</sup>). D'abord, il s'agit de la distance Syène-Méroé, et non pas Syène-Alexandrie. Ensuite, cette affirmation de Martianus Capella est à prendre avec précaution, d'une part car il écrivait plus de sept

42 - Edme-François Jomard, *Mémoire sur le système métrique des anciens Égyptiens, contenant des recherches sur leurs connoissances géométriques et sur les mesures des autres peuples de l'antiquité* (Paris : Imprimerie royale, 1817), 169.

43 - Martianus Capella, *De nuptiis Philologiae et Mercurii*, livre VI, § 598 (éd. Ulrich Friedrich Kopp [Francfort : Franz Varrentrapp, 1836], 500).

siècles après Ératosthène et ensuite parce que Méroé – alors capitale du royaume de Koush – était une ville nubienne située très au sud de Syène, entre la cinquième et la sixième cataracte du Nil; elle n’a jamais fait partie du royaume des Ptolémées. Il serait donc étonnant que les arpenteurs royaux de Ptolémée se soient aventurés jusque-là.

On sait également que Strabon, au tout début de son livre consacré à la description de l’Égypte, indiquant la longueur des différentes sections du Nil depuis Méroé, écrit : « Le Nil, dit [Ératosthène], coule [...] jusqu’à la cataracte plus petite à Syène; enfin encore sur 5 300 stades jusqu’à la mer<sup>44</sup>. » En rapprochant ce passage de Strabon et celui de Cléomède, on a généralement déduit qu’Ératosthène comptait, entre Syène et Alexandrie, 5 300 stades en suivant les sinuosités du fleuve et 5 000 stades en ligne droite.

Quelle que soit la façon dont Ératosthène a évalué la distance entre Syène et Alexandrie (et dans ce vide documentaire, toutes les suppositions ont été émises, jusqu’à l’utilisation des dromadaires!), il reste que, si l’on retient une longueur de 158 m pour son stade, cette distance est fautive. En effet, on obtient 790 km, soit 6,3 % de moins que les 843 km qu’on mesure aujourd’hui entre Assouan et Alexandrie.

Cette erreur de 6,3 % est cohérente avec l’écart-type (14,3 m) que nous avons calculé sur l’échantillon de Firsov. En effet, un tel écart-type signifie qu’environ les deux tiers (68,3 %) des distances mesurées se trouveront à moins de 9,2 % de la distance réelle.

Notons que, si l’on prend la valeur de 185 m du « stade long », l’erreur est encore plus importante : on obtient 925 km, soit près de 10 % de plus.

Remarquons que (si l’on reste sur un stade de 158 m) les deux erreurs – similitude de méridien et distance entre les deux villes – se compensent parfaitement : en effet, la distance de 5 000 stades est (à 1 km près : 790 pour 791!) égale à la distance entre les parallèles des deux villes.

Cette heureuse coïncidence a conduit certains commentateurs à

44 - Strabon, *Géographie*, XVII, 1, 2 (*op. cit.* in n. 23, t. XIV, 2).

affirmer qu'avec ses 5 000 stades, Ératosthène prétendait évaluer la distance, non pas entre les deux villes, mais entre leurs deux parallèles. On peut évidemment se permettre de tout dire! Cependant, une telle affirmation contredit les deux premiers « pré-supposés » d'Ératosthène, tels que rapportés explicitement par Cléomède qui, redisons-le, est notre seule source sur le sujet.

### **Syène n'était pas située sous le tropique du cancer**

Là encore, c'est Cléomède qui écrit : « [Ératosthène] dit – et c'est un fait – que Syène est située sous le cercle du tropique d'été ». Or, ce « fait » est faux et l'était déjà à l'époque d'Ératosthène.

Certes, en conséquence de la variation de l'obliquité de l'écliptique, on sait que la position du tropique se déplace lentement vers le sud. Cependant, à l'époque d'Ératosthène, le tropique du cancer se trouvait à 23°43' de l'équateur<sup>45</sup>, c'est-à-dire déjà à 22' au sud de Syène<sup>46</sup>.

Comment Ératosthène est-il arrivé à faire le constat que Syène se trouvait sous le tropique? Comme pour les 5 000 stades, nous n'en savons absolument rien. En particulier, on ne trouve dans aucun document qu'Ératosthène, vivant à Alexandrie, se soit jamais déplacé à Syène.

On trouve seulement deux passages d'auteurs anciens qui évoquent un certain puits de Syène, passages sur lesquels on n'a pas manqué de gloser, bien qu'aucun des deux ne fasse référence explicite à Ératosthène.

Le premier passage est de Strabon qui, on le sait, avait visité Syène : « Quand Gallus exerçait son commandement en Égypte, nous sommes allés le voir et l'avons accompagné dans sa remontée du Nil jusqu'à Syène<sup>47</sup>. »

45 - Voir Jacques Laskar, Secular terms of classical planetary theories using the results of general theory, *Astronomy and astrophysics*, 157 (1986), 59-70, ainsi qu'un programme informatique de Jay Tanner, « Obliquity of the ecliptic, nutation in obliquity and latitudes of the arctic / antarctic circles », <https://www.phpsciencelabs.com/obliquity-of-the-ecliptic-calculator/>.

46 - Dans tout ce chapitre sur le calcul de la précision de la mesure d'Ératosthène, les latitudes et les angles sont arrondis à la minute ('). Vu le résultat final (20 à 25 % d'imprécision), cet arrondi est largement justifié.

47 - Strabon, *Géographie*, II, 5, 12 (*op. cit.* in n. 23, t. I, 2<sup>e</sup> part., 93).

À cette occasion, Strabon avait noté : « On peut aussi voir à Syène le puits qui indique le solstice d'été et le fait que ces lieux s'étendent sous le cercle du tropique. En effet, si l'on part de notre pays – c'est-à-dire des régions grecques – pour avancer vers le sud, c'est à cet endroit d'abord que le soleil sera juste au-dessus de nos têtes et fera que les gnomons ne projetteront aucune ombre à midi ; et quand il est juste au-dessus de nos têtes, il envoie nécessairement ses rayons au fond du puits jusqu'à atteindre l'eau, pour très profonde qu'elle soit, puisque nous nous tenons debout à la verticale et que les puits sont aussi creusés à la verticale <sup>48</sup>. »

Le second passage est de Pline qui écrit : « De même à Syène, qui est à 5 000 stades au-dessus d'Alexandrie, le jour du solstice à midi il n'y a pas d'ombre, et, pour mieux constater la merveille, on y a construit un puits qui alors se trouve totalement éclairé : preuve que le Soleil est alors perpendiculaire à ce lieu <sup>49</sup>. »

De là à conclure que ce fameux puits avait été construit trois siècles plus tôt, sur ordre du roi Ptolémée, exprès pour permettre à Ératosthène de réaliser sa mesure de la Terre, il y a un grand pas que de nombreux commentateurs n'ont pas hésité à franchir.

### **L'angle ne mesure pas un cinquantième de la circonférence**

C'est la quatrième approximation d'Ératosthène.

Continuons à suivre Cléomède pas à pas : puisqu'Ératosthène considère que Syène est située exactement sur le tropique, le jour du solstice d'été, à midi, « les gnomons des cadrans solaires ne projettent plus aucune ombre, du fait que le Soleil se trouve au-dessus, exactement à la verticale. [...] Mais à Alexandrie, à la même heure [et le même jour], les gnomons des cadrans solaires projettent une ombre. [...] Traçons un arc de cercle de l'extrémité de l'ombre du gnomon jusqu'à la base même du gnomon de ce

48 - Strabon, *Géographie*, XVII, 1, 48 (*op. cit.* in n. 23, t. XIV, 64).

49 - Pline, *Histoire naturelle*, livre II, ch. LXXV (trad. Grandsagne, *op. cit.* in n. 19, t. 2, 165).



cadran solaire<sup>50</sup> d'Alexandrie. [...] Or, on constate que [cet] arc de cercle représente la cinquantième partie du cercle total. »

L'angle que mesurait ainsi Ératosthène était donc l'angle que formait, le jour du solstice d'été, à Alexandrie, à midi, les rayons solaires avec la verticale. Or, cet angle était évidemment égal à la différence de latitude entre Alexandrie et le tropique du cancer de son époque, différence dont nous connaissons aujourd'hui la valeur :  $31^{\circ}12' \text{ N} - 23^{\circ}43' \text{ N} = 7^{\circ}29'$ .

Mais la « cinquantième partie du cercle total » ( $360^{\circ}/50$ ) représente  $7^{\circ}12'$ . En conséquence, l'erreur sur la mesure par Ératosthène de l'angle des rayons du Soleil était de  $17'$ <sup>51</sup>.

Pour la mesure des distances, nous avons vu que les deux erreurs (sur la similitude du méridien et sur la distance proprement dite entre les deux villes) s'annulaient à peu près parfaitement. Il se trouve qu'il en est presque de même pour la mesure de l'angle : l'erreur sur la position de Syène par rapport au tropique ( $22'$ ) est largement compensée par l'erreur sur la mesure de l'angle proprement dit des rayons du Soleil à Alexandrie ( $17'$ ).

Ainsi, il ne reste plus qu'une différence de  $5'$  sur la mesure de l'angle. On retrouve évidemment cette même différence de  $5'$  entre l'écart de latitude entre Alexandrie et Syène ( $31^{\circ}12' - 24^{\circ}5' = 7^{\circ}7'$ ), et l'angle mesuré par Ératosthène ( $360^{\circ}/50 = 7^{\circ}12'$ ).

Deux erreurs de distance qui se compensent parfaitement et

50 - D'après la description faite ici par Cléomède et bien qu'il n'emploie pas le mot, il semble que son « cadran solaire » soit en fait un *scaphé*, c'est-à-dire, selon la description de Girard, « un hémisphère concave, sur le fond duquel s'élevait verticalement un gnomon qui avait son extrémité supérieure au centre même de l'hémisphère. Le Soleil étant parvenu au méridien, l'ombre du gnomon couvrait, sur l'intersection du plan de ce grand cercle et de l'hémisphère concave, un arc précisément égal à celui qui était compris entre le zénith du lieu de l'observation et le centre du Soleil, puisque cet arc mesurait évidemment l'angle formé par la verticale et les rayons solaires. » Girard, *op. cit.* in n. 2, 33.

51 - Nous avons délibérément choisi de ne pas nous intéresser à la cause des erreurs de mesure d'angle. Robert R. Newton (The sources of Eratosthenes' measurement of the Earth, *The quarterly journal of the Royal Astronomical Society*, 21/1 [1980], 379-387) et Dennis Rawlins (Eratosthenes' geodesy unraveled : Was there a high-accuracy Hellenistic astronomy? *Isis*, 73/2 [1982], 259-265) ont tenté de défricher ce vaste sujet. Nous nous bornons, ici, à simplement constater ces erreurs. Pour calculer la précision de la mesure d'Eratosthène, il n'est en effet pas nécessaire d'aller plus loin.

deux erreurs d'angle qui se compensent partiellement permettent, en fin de compte, d'obtenir un résultat qui se trouve à moins de 0,5 % du résultat connu aujourd'hui.

L'exactitude de la mesure d'Ératosthène s'avère excellente. Qu'en est-il de sa précision ?

### **Quelle est la précision de la mesure de la Terre par Ératosthène ?**

Alors que l'exactitude d'une mesure peut résulter de la compensation éventuelle des erreurs (ce fut le cas chez Ératosthène, comme nous venons de le voir), la précision se calcule, au contraire, en cumulant toutes les erreurs possibles. Il convient cependant de vérifier, au préalable, que ces erreurs sont bien indépendantes les unes des autres.

C'est le cas ici : les quatre erreurs que nous avons recensées (similitude de méridien, distance de 5 000 stades entre les deux villes, Syène sur le tropique et le rayon solaire à Alexandrie faisant un angle de  $1/50^\circ$  avec la verticale) participent, à l'évidence, de domaines complètement différents.

Remarquons que cela n'aurait pas été le cas si, au lieu de mesurer un angle à Alexandrie et supposer Syène sur le tropique, Ératosthène avait mesuré l'angle des rayons du Soleil à la fois à Alexandrie et à Syène. Dans ce cas, des erreurs systématiques éventuelles sur la mesure de l'angle auraient pu se compenser puisque le résultat utilisé aurait été la différence entre les deux mesures. La « double mesure » est d'ailleurs une façon très classique d'améliorer la précision d'une mesure.

Un passage de Cléomède laisse entrevoir une telle possibilité :

« On installe également des cadrans aux jours du solstice d'hiver en chacune des deux villes [Syène et Alexandrie] et, bien que les deux cadrans projettent des ombres, on constate que l'ombre à Alexandrie est nécessairement plus grande à cause du plus grand éloignement de cette ville par rapport au tropique d'hiver. En prenant par conséquent l'excédent de l'ombre d'Alexandrie sur celle de Syène, on constate que cet excédent est la cinquième partie du grand cercle contenu dans le cadran solaire. »

### *Comment la mesure de la Terre par Ératosthène...*

Le problème est que ce passage se situe en dehors de ce que Cléomède appelle explicitement « la méthode d'Ératosthène ». À lire Cléomède, il n'est donc pas possible de considérer qu'Ératosthène (ni lui, ni aucun de ses éventuels collaborateurs) se soit transporté à Syène pour y effectuer des mesures astronomiques.

Sans quitter Alexandrie, il est néanmoins possible qu'Ératosthène ait effectué une double mesure d'angle. Ainsi, Ptolémée (*Almageste*, I, 12) indique qu'Ératosthène aurait mesuré l'obliquité de l'écliptique (la distance angulaire entre les deux tropiques) et obtenu la valeur de  $11/83^{\circ}$  de la circonférence. D'une part, cette affirmation de Ptolémée a été contestée et d'autre part, Ptolémée n'indique pas comment Ératosthène a procédé. Mais supposons que Ptolémée ait dit vrai. Dans ce cas, Ératosthène aurait pu, en effet, mesurer les rayons solaires à Alexandrie au moment de chacun des deux solstices (été et hiver) et en faire la différence, annulant ainsi les erreurs systématiques de mesure d'angle.

La valeur obtenue par Ératosthène, selon Ptolémée, ( $11/83^{\circ}$  de  $360^{\circ}$ ) représente  $47^{\circ}43'$ , soit  $17'$  de plus de ce qu'était l'obliquité de l'écliptique à l'époque d'Ératosthène ( $2 \times 23^{\circ}43'$ ), c'est-à-dire une erreur de 0,6 % seulement !

Signalons également qu'Ératosthène a pu réaliser une double mesure d'angle entre Alexandrie et Rhodes. C'est ce que suggère un passage de Strabon qui rapporte que, « au moyen des gnomons à ombre, [Ératosthène] aurait trouvé [entre les deux ports d'Alexandrie et Rhodes] une distance de 3 750 stades<sup>52</sup> ». Contrairement à la distance terrestre Alexandrie-Syène, la distance maritime Alexandrie-Rhodes ne pouvait évidemment pas être mesurée par d'éventuels arpenteurs. Selon Germaine Aujac<sup>53</sup>, la formulation de Strabon était une manière de dire qu'Ératosthène (compte tenu des 252 000 stades qu'il donnait à la circonférence terrestre) avait mesuré *au moyen des gnomons à ombre* une différence de latitude entre les deux villes de l'ordre de  $5^{\circ}21'$  ( $360^{\circ} \times 3\,750/252\,000$ ). Or, la différence réelle de latitude entre le port de Rhodes ( $36^{\circ}27' \text{ N}$ ) et celui d'Alexandrie ( $31^{\circ}12'$

52 - Strabon, *Géographie*, II, 5, 24 (*op. cit.* in n. 23, t. I, 2<sup>e</sup> part., 107).

53 - Germaine Aujac, *La Sphère, instrument au service de la découverte du monde : D'Autolykos de Pitane à Jean de Sacrobosco* (Caen : Paradigme, 1993), « Astronomie et géographie scientifique dans la Grèce ancienne », 77-97, 83.

N) est de  $5^{\circ}15'$ , soit une erreur de mesure de  $6'$ , c'est-à-dire 2 % seulement<sup>54</sup>.

On voit sur ces deux exemples comment une double mesure d'angle améliore considérablement la précision. Mais, selon Cléomède, pour sa mesure de la circonférence de la Terre, Ératosthène n'a effectué qu'une seule mesure d'angle, à Alexandrie. Nous n'avons donc pas d'autre choix que de nous y tenir.

Revenons à notre calcul de la précision d'ensemble de la mesure.

Considérant que les quatre erreurs commises par Ératosthène sont bien indépendantes, il convient donc de les ajouter. L'opération se fait en deux étapes. Dans la première :

- l'erreur sur la similitude de méridien (6,2 %) et l'erreur sur la distance entre les deux villes (6,3 %) se cumulent :  $1,062 \times 1,063 = 1,129$ ;
- l'erreur sur le « fait » de mettre Syène sur le tropique ( $22'$ ) s'ajoutant à l'erreur sur la mesure de l'angle à Alexandrie ( $17'$ ), l'erreur résultante ( $39'$ ) représente 9 % des  $7^{\circ}12'$  ( $360^{\circ}/50$ ) mesurés.

Dans la seconde étape, il convient de cumuler l'erreur sur la distance (12,9 %) et l'erreur sur l'angle (9 %), ce qui donne :  $1,129 \times 1,09 = 1,23$ .

En conséquence, et sous la seule réserve, bien sûr, que les éléments rapportés par Cléomède, tant au niveau de la méthode employée (simple mesure d'angle) que des données retenues, soient vraiment ceux qu'Ératosthène a utilisés, on peut affirmer que la précision de la mesure d'Ératosthène n'était pas meilleure que 20 à 25 %.

Une autre question vient donc immédiatement à l'esprit : Ératosthène était-il conscient d'une telle imprécision de sa mesure ? Plusieurs éléments permettent de pencher vers une réponse positive.

D'abord, nous l'avons vu, il est difficile de penser que le géographe Ératosthène ait pu considérer que son hypothèse d'une

<sup>54</sup> - Rawlins (*op. cit.* in n. 51, 260), qui tient compte de la réfraction et de la parallaxe, calcule une erreur un peu plus importante :  $7,6'$ , c'est-à-dire 2,4 %.

similitude de méridien était absolument exacte.

Par ailleurs, il faut savoir que le polymathe Ératosthène était un grand mathématicien. Or, on ne voit pas dans tous ces zéros par lesquels se terminent les deux seuls nombres (5 000 et 50) utilisés pour faire sa multiplication ( $5\,000 \times 50 = 250\,000$ ) la trace d'un savant qui cherche à affiner son calcul.

Enfin, un passage de Cléomède a, jusqu'ici, été insuffisamment relevé. Lorsque, dans l'exposé qu'il donne de la méthode d'Ératosthène, Cléomède cite le « fait » que Syène est sous le tropique et que, par conséquent, le jour du solstice d'été, à midi, « le Soleil se trouve au-dessus, exactement à la verticale », Cléomède ajoute aussitôt : « Et on rapporte que cela se produit sur une circonférence de 300 stades de diamètre. »

Il est vrai que Cléomède ne dit pas explicitement qu'Ératosthène avait conscience de ces 300 stades. Il écrit simplement « on rapporte ». Cependant, on peut penser que l'astronome Ératosthène avait compris que, compte tenu de la taille du Soleil, le critère de la verticalité de ses rayons était forcément approximatif.

Dans la liste des approximations commises par Ératosthène, nous n'avons pas mentionné l'hypothèse qu'il fait d'un Soleil situé à l'infini. Dans l'exposé de Cléomède, c'est même son troisième présupposé : « Troisièmement, [supposons] que les rayons projetés depuis les différentes parties du Soleil sur des parties différentes de la Terre sont parallèles. C'est en effet ce que supposent les géomètres. »

On sait qu'Ératosthène, comme tous les Grecs d'ailleurs, plaçait le Soleil à une distance finie de la Terre. Ce *présupposé* est donc une approximation tout à fait consciente. C'est d'ailleurs un argument supplémentaire qui prouve qu'Ératosthène ne cherchait pas une mesure précise. Cette approximation était cependant parfaitement justifiée puisque l'erreur qu'elle entraînait était de l'ordre de 1 % seulement.

Finalement, la seule chose précise qu'Ératosthène a correctement menée est cette démonstration géométrique basée sur les *Éléments* d'Euclide (selon laquelle l'angle des rayons à Alexandrie avec la verticale est égal à l'angle au centre de la Terre sous-tendu par l'arc Alexandrie-Syène), démonstration sur laquelle

ont travaillé tant de générations de lycéens.

**Que penser maintenant des deux valeurs :  
250 000 et 252 000 stades ?**

Généralement, on résout le problème en considérant qu'Ératosthène a d'abord trouvé 250 000 stades, puis arrondi sa mesure, ou plutôt le résultat de la division de sa mesure par 60. En effet, selon Strabon<sup>55</sup>, Ératosthène divisait le cercle équatorial en soixante parties (et non pas en 360 degrés<sup>56</sup>) : « L'équateur valant donc, d'après Ératosthène, 252 000 stades de tour, le quart vaudrait 63 000 stades ; cela fait que la distance de l'équateur jusqu'au pôle représente en stades quinze de ces *soixantièmes* dont l'équateur vaut *soixante*. [...] De Syène à l'équateur on compte 16 800 stades (c'est la valeur de quatre *soixantièmes*, en les supposant de 4 200 stades l'un). »

Plusieurs commentateurs modernes ont proposé d'autres explications à cet écart de 2 000 stades<sup>57</sup>.

Pourtant, compte tenu de l'imprécision de la mesure d'Ératosthène que nous avons mise en évidence (20 à 25 %), imprécision dont celui-ci avait sans doute conscience, il paraît clair que l'hypothèse d'un arrondi (inférieur à 1 %) effectué par Ératosthène lui-même semble être la meilleure réponse à la question.

55 - Strabon, *Géographie*, II, 5, 7 (*op. cit.* in n. 23, t. I, 2<sup>e</sup> part., 86).

56 - Ce n'est qu'à partir du siècle suivant, avec Hipparque (II<sup>e</sup> s. av. J.-C.), que le cercle sera divisé en 360°.

57 - Il y a ceux qui, écartant les 250 000 stades de Cléomède obtenus avec une distance de 5 000 stades et un angle de  $1/50^\circ$ , suggèrent qu'Ératosthène avait obtenu directement 252 000 stades. Pour ce faire, ils changent la distance : 5 040 stades (Gulbekian, The origin and value of the stadion unit used by Eratosthenes in the third century BC, *Archive for the history of exact sciences*, 37 [1987], 359-363), ou l'angle :  $1/50,4^\circ$  (Öttinger, *Die Vorstellungen der alten Griechen und Römer über die Erde als Himmelskörper* [Freiburg, 1850], 102-105, suivi en 2018 par Shcheglov, *op. cit.* in n. 6), ou encore à la fois la distance et l'angle : 5 250 stades et  $1/48^\circ$  (Viedebant en 1915, *op. cit.* in n. 40, suivi en 2013 par Russo, Ptolemy's longitudes and Eratosthenes' measurement of the Earth's circumference, *Mathematics and mechanics of complex systems*, 1 [2013], 67-79). De son côté, Goldstein procède un peu différemment (Eratosthenes on the « measurement » of the Earth, *Historia mathematica*, 11 [1984], 411-416). D'autres pensent, au contraire, qu'Ératosthène a utilisé deux méthodes différentes qui lui ont permis d'obtenir deux valeurs (250 000 et 252 000) destinées à « encadrer » la valeur réelle, comme Christian C. Carman et James Evans, The two Earths of Eratosthenes, *Isis*, 106 (2015), 1-16, ou encore Irina Tupikova (Eratosthenes' measurements of the Earth : Astronomical and geographical solutions, *Orbis terrarum*, 16 [2018], 221-254).

Il faut, en effet, avoir présent à l'esprit l'extrême difficulté qui se présentait aux Grecs pour effectuer une division avec leur numération alphabétique. Letronne insiste justement sur « l'usage constant où étaient les anciens de ne donner que des nombres ronds, en omettant les unités simples, les dizaines, et souvent même les centaines; c'est pourquoi la majeure partie des distances qu'ils nous ont transmises sont exprimées en nombres terminés par plusieurs zéros : ils y étaient forcés par l'imperfection de leur arithmétique, qui rendait fort compliquées les opérations les plus simples dès qu'il y entrait la moindre fraction<sup>58</sup> ».

C'est ainsi que, grâce à l'arrondi, Ératosthène a obtenu 4 200 stades (au lieu de 4 166,66...) pour son degré de 60 à la circonférence et que, plus tard (quand on divisera le cercle en 360°), on obtiendra 700 stades (au lieu de 694,44...) par degré.

## Épilogue

Si l'on retient l'hypothèse proposée par Girard dès 1802 (et confirmée par Firsov en 1972), que le stade utilisé par Ératosthène faisait 158 m, la mesure de la Terre par Ératosthène est exacte à 0,5 %. Mais exactitude n'est pas précision. La mesure d'Ératosthène ne se trouve aujourd'hui exacte que par hasard, alors que sa précision était tributaire de sa méthode (notamment une seule mesure d'angle) et des instruments de mesure (d'angle et de distance) rudimentaires de l'époque. Alors que nous avons montré que sa précision ne pouvait pas être meilleure que 20 à 25 %, nous avons vu que ses quatre erreurs (deux de distance et deux d'angle) ont eu la chance de se compenser deux à deux, presque parfaitement.

Il y a deux cents ans, Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) avait déjà tout dit de l'imprécision de la mesure d'Ératosthène. Il est vrai que Delambre, ne sachant pas que le stade d'Ératosthène valait 158 m, ne savait pas non plus à quel point sa mesure se révélerait exacte. En revanche, il savait qu'elle ne pouvait être qu'imprécise. Tout à la fois astronome, mathématicien, géomètre et historien, Delambre était un orfèvre en la matière puisqu'il avait consacré de nombreuses années, tant sur le plan théorique

<sup>58</sup> - Letronne, *op. cit.* in n. 4, 5.

que pratique, à la mesure d'un arc de méridien pour servir à la définition du mètre.

Dans sa monumentale *Histoire de l'astronomie* en cinq volumes, on peut lire :

« Ératosthène savait mieux que personne qu'il lui était impossible de répondre de ces quantités [5 000 stades et 1/50<sup>e</sup> de cercle] : il avait négligé la différence des méridiens; il avait négligé les détours du chemin qui n'était sûrement pas une ligne parfaitement droite; il avait négligé les inégalités du terrain, car une route de 7 degrés ne saurait être dans la même surface sphérique; il était bien évident de plus que les 5 000 stades ne pouvaient être qu'une approximation; l'arc céleste ne pouvait être sûr à 2' près; l'espace où les ombres sont nulles, à Syène, s'étend circulairement dans un rayon de 150 toises. Tout était donc incertain dans son calcul; mais ce calcul était d'un homme d'esprit qui aperçoit ce qu'il faudra faire pour obtenir avec précision la grandeur de la Terre, quand on aura [...] des mesures plus précises qui demanderaient bien des soins, bien du temps et de grandes dépenses<sup>59</sup>. »

En ignorant Delambre, nombre de commentaires modernes de la mesure d'Ératosthène s'avèrent vains et sans fondement.

## Annexe : Les 84 itinéraires de Strabon retenus par Firsov<sup>60</sup>

Itinéraire considéré	Distance en stades (Strabon)	Référence dans la <i>Géographie</i> de Strabon <sup>(1)</sup>	Distance réelle en km	Stade résultant en m
<i>Mer Méditerranée</i>				
Golfe d'Issos - Rhodes	5 000	II, 4, 3 (t. I2, 73)	760	152
Rhodes - cap Salmonion (pointe est de la Crète)	1 000	<i>ibid.</i>	150	150
Cap Salmonion - Front de Bélier (pointe ouest de la Crète)	2 000	<i>ibid.</i>	250	125
Front de Bélier - cap Pachynos (pointe sud-est de la Sicile)	4 500 <sup>(11)</sup>	<i>ibid.</i>	770	171

*continue page suivante*

59 - Delambre, *Histoire de l'astronomie ancienne* (Paris : Courcier, 1817), t. 1, ch. vii, 89.

60 - Firsov, *op. cit.* in n. 3, 168-174.



*Comment la mesure de la Terre par Ératosthène...*

Itinéraire considéré	Distance en stades (Strabon)	Référence dans la <i>Géographie</i> de Strabon <sup>(i)</sup>	Distance réelle en km	Stade résultant en m
<i>Mer Méditerranée</i>				
Cap Pachynos - Détroit de Sicile	1 000	<i>ibid.</i>	300	300
Détroit de Sicile - Colonnes d'Hercule	12 000	<i>ibid.</i>	1 530	127,5
Cap Ténare (Laconie) - cap Pachynos	4 450 <sup>(iii)</sup>	II, 5, 20 (t. I2, 103)	674 <sup>(iv)</sup>	151,5
Carthage - cap Lilybée (pointe nord-ouest de la Sicile)	1 500	XVII, 3, 16 (t. XV, 21)	215	143
Ébre - Trophée de Pompée (le Perthus)	1 600	III, 4, 1 (t. II, 60)	275	172
Bérénice - Zante	3 600	XVII, 3, 20 (t. XV, 28)	620	172
Cap Phykous (Libye) - cap Ténare	2 800	<i>ibid.</i>	380	136
Port des Cyrénéens - Front de Bélér	2 000	XVII, 3, 20 (t. XV, 29)	300	150
Colonnes d'Hercule - Marseille	7 000	II, 4, 4 (t. I2, 74)	1 290	184
Colonnes d'Hercule - Pyrénées	6 000	<i>ibid.</i>	1 085	181
Cap Anémurium - pointe de Crommyus	350	XIV, v, 3 (t. III, 169)	72	206
Citium - Béryste	1 500	XIV, vi, 3 (t. III, 194)	200	133,5
Acamas - Sélinus (côte de Cilicie Trachée)	1 000	XIV, vi, 2 (t. III, 193)	133	133
Acamas - Chélidonies	1 900	<i>ibid.</i>	300	158
Acamas - Side (côte de Pamphylie)	1 600	<i>ibid.</i>	225	141
Rhodes - Alexandrie	3 750	II, 5, 24 (t. I2, 107)	600	160
<i>Chypre et Péloponnèse</i>				
Tour de Chypre (sinuosités de la côte comprises)	3 420	XIV, vi, 2 (t. III, 193)	550	161
Longueur de Chypre (Acamas - les Clides)	1 400	<i>ibid.</i>	225	161
Pointe du Crommyus - les Clides	700	XIV, vi, 3 (t. III, 193)	150	214,5
Cap Pédalium - les Clides	680	XIV, vi, 3 (t. III, 194)	105	154,5
Tour de Péloponnèse (par la côte)	5 600	VIII, 2, 1 (t. V, 56)	890	159
Longueur du Péloponnèse	1 400	<i>ibid.</i>	225	161
Largeur du Péloponnèse	1 400	<i>ibid.</i>	163	116
Périmètre du golfe de Corinthe	2 230	VIII, 2, 3 (t. V, 59)	350	157
Isthme de Corinthe - cap Araxos	1 030	<i>ibid.</i>	160	155,5
Embouchure de l'Alphée - cap Chélonatas	280	VIII, 3, 12 (t. V, 78)	44	157
Embouchure de l'Alphée - cap Araxos	545	<i>ibid.</i>	85	156
Cap Ténare - cap Malée (sinuosités de la côte comprises)	670	VIII, 5, 1 (t. V, 133)	105	157

*continue page suivante*

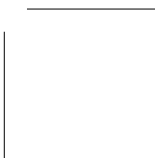
Itinéraire considéré	Distance en stades (Strabon)	Référence dans la <i>Géographie</i> de Strabon <sup>(i)</sup>	Distance réelle en km	Stade résultant en m
<i>Italie</i>				
Gênes - port de Monœcus	1 110	IV, 6, 1 (t. II, 169-170)	159	143,5
Placentia - Derto	400	V, 1, 11 (t. III, 53)	72,5	181
Derto - Gênes	400	<i>ibid.</i>	52,5	131
Luna - Cosa	1 750	V, 2, 5 (t. III, 62)	270	154,5
Cosa - Ostie	740 <sup>(v)</sup>	<i>ibid.</i>	115	155,5
Rome - Arrétium	1 200	V, 2, 9 (t. III, 72)	190	158,5
Rome - Clusium	800	<i>ibid.</i>	125	156
Ravenne - Ariminum	300	V, 2, 10 (t. III, 73)	48,5	161,5
Ariminum - Ocricoli (sur le Tibre) par la Via Flaminia	1 350	<i>ibid.</i>	210	155,5
Tibre, de Rome à son embouchure	190	V, 3, 5 (III, 83)	30	158
Antium - Mont Circeo	290	V, 3, 6 (t. III, 84)	45	155
Mont Circeo - Tarracina	100	V, 3, 6 (t. III, 85)	16	160
Élée - Laos	400	VI, 1, 1 (t. III, 126)	62,5	156
Élée - Posidonia	200	VI, 1, 1 (t. III, 125)	32	160
Colonne de Rhégion - Rhégion	100	VI, 1, 5 (t. III, 134)	15	150
Rhégion - Locres	600	VI, 1, 7 (t. III, 138)	93	155
Brentésion - Barium	700	VI, 3, 8 (t. III, 184)	105	150
Barium - cours de l'Aufidus	400	VI, 3, 9 (t. III, 184)	60	150
<i>Rives sud et est de la Méditerranée</i>				
Cap Métagonion - cap Tréton	6 000	XVII, 3, 9 (t. XV, 11)	890	148,5
Cap Tréton - Carthage	2 500	XVII, 3, 13 (t. XV, 17)	375	150
Carthage - Képhalai (les Têtes)	5 000	XVII, 3, 18 (t. XV, 24)	860	172
Apollonia - Katabathmos	2 200	XVII, 3, 22 (t. XV, 31)	340	154,5
Alexandrie - Carthage	13 000	II, 1, 40 (t. I2, 52)	2 000	154
Péluse - bouche Canopique	1 300	XVII, 1, 6 (t. XIV, 12)	205	157,5
Péluse - Orthosie	3 650	XVI, II, 33 (t. III, 343)	565	155
Orthosie - Oronte	1 130	<i>ibid.</i>	175	155
Oronte - Melaenae	2 420	<i>ibid.</i>	400	165
<i>Pont Euxin (mer Noire)</i>				
Byzance - embouchure du Borysthène <sup>(vi)</sup>	3 800	II, 5, 22 (t. I2, 105)	625	164,5
Largeur du Pont Euxin occidental	2 800 <sup>(vii)</sup>	<i>ibid.</i>	440	157
Istros (Danube) - Kyanées	3 830	VII, 6, 1 (t. IV, 128)	580	151,5
Chalcédon - Héracléia	1 500	XII, 3, 7 (t. IX, 67)	225	150
Héracléia - Sangarios	500	<i>ibid.</i>	75	150
Sinope - Chalcédon	3 500	XII, 3, 11 (t. IX, 74)	550	157
Sinope - Héracléia	2 000	<i>ibid.</i>	325	162,5
Sinope - Amisos	900	XII, 3, 14 (t. IX, 76)	140	155,5
Amisos - Trapézonte (par la mer)	2 200	XII, 3, 17 (t. IX, 79)	300	136,5
Trapézonte - le Phase	1 400	<i>ibid.</i>	240	171,5

continue page suivante

*Comment la mesure de la Terre par Ératosthène...*

Itinéraire considéré	Distance en stades (Strabon)	Référence dans la <i>Géographie</i> de Strabon <sup>(i)</sup>	Distance réelle en km	Stade résultant en m
<i>Pont Euxin (mer Noire)</i>				
Le Tanaïs - Bourg Cimmérien	2 320	XI, 2, 4 (t. VIII, 45)	360	155,5
Longueur de la côte de Tauride	1 000	VII, 4, 3 (t. IV, 106)	158	158
Golfe d'Issos - Amisos	3 000	II, 1, 3 (t. I2, 13)	495	165
<i>Divers</i>				
Côte sud de la (Grande) Bretagne	4 150 <sup>(viii)</sup>	IV, 5, 1 (t. II, 164)	680	164
Longueur du golfe Persique (côte Arabique)	14 000	XVI, iv, 4 (t. III, 361)	2 160	154,5
Issos - Zeugma (sur l'Euphrate)	1 400	XVI, ii, 1 (t. III, 322)	215	154
Longueur de la Lusitanie	3 000	III, 3, 3 (t. II, 53)	482	161
Gadéira - Promontoire Sacré (cap Saint Vincent)	1 700	III, 2, 11 (t. II, 45)	250	147
Longueur de la péninsule ibérique	6 000	II, 5, 27 (t. I2, 110)	900	150
Largeur de la péninsule ibérique	5 000	<i>ibid.</i>	760	152
Longueur de la Propontide (mer de Marmara)	1 400	VII, fr.56 (t. IV, 179)	215	153,5
Largeur de la Propontide	500	<i>ibid.</i>	75	150
Périnthe - Byzance	600	<i>ibid.</i>	93	155
Côté nord du triangle sicilien (cap Lilybée - cap Pélorias)	1 700	VI, 2, 1 (t. III, 159)	285	168
Côté est du triangle sicilien (cap Pélorias - cap Pachynos)	1 130	<i>ibid.</i>	187	165,5

Notes : (i) – Firsov n'indique, comme référence, que la page de la traduction de Strabon en russe par G. A. Stratanovsky. En me basant sur la traduction en français des Belles Lettres (*op. cit. in n. 23*), sauf pour les livres XIV et XVI (trad. Amédée Tardieu, *op. cit. in n. 41, t. 3*), j'ai indiqué la référence traditionnelle en livre, chapitre et paragraphe et, entre parenthèse, le tome et la page. I2 désigne le tome I, 2<sup>e</sup> partie. (ii) – Firsov a probablement fait une faute de frappe car son document indique 4 000 ce qui ne correspond ni au texte de Strabon, ni au résultat de la division. (iii) – Les Belles Lettres (éd. Germaine Aujac, t. I, 2<sup>e</sup> part.) indique 4 500 stades. (iv) – Le nombre de km donné par Firsov (650) pour cet itinéraire ne donne pas le résultat de 151,5 m indiqué par Firsov pour le stade. Pour l'obtenir, il faut 674 km (ainsi corrigé). (v) – Les Belles Lettres (éd. François Lasserre, t. III) donne 750 stades (2 500 moins 1 750). (vi) – Chez Strabon, cet itinéraire de 3 800 stades apparaît deux fois : II, 5, 8 et II, 5, 22 (éd. Aujac, t. I, 2<sup>e</sup> part., 88 et 105). Firsov a indiqué les deux mais n'en a compté qu'un seul dans ses moyennes. Ici, il n'en est donné qu'un. (vii) – Les Belles Lettres (éd. Aujac, t. I, 2<sup>e</sup> part.) indique 2 000 stades. (viii) – Firsov prend le milieu de la fourchette donnée par G. A. Stratanovsky (4 000-4 300). Pour cette même fourchette, Les Belles Lettres (éd. Lasserre, t. II) donne 4 300-4 400.



# La copie de physique d'Évariste Galois au concours de l'École préparatoire en 1829 : Une sonde pour explorer la physique en tant que discipline scolaire \*

Aurélien Gautreau \*\*

**Résumé :** En août 1829, Évariste Galois, élève du collège royal Louis-le-Grand, compose les épreuves écrites du concours de l'École préparatoire. Cet examen est le seul de cette décennie à comporter des questions écrites de physique. Le candidat Galois présente l'avantage d'avoir laissé des œuvres et archives qui ont été largement étudiées et mises en contexte, ce qui permet de situer plus précisément l'enseignement de physique qu'il a reçu. La valeur heuristique de sa copie est d'éclairer l'étude de la physique comme discipline scolaire sous ses différents plans de contenus savants, de variété des méthodes d'enseignement et des institutions concernées. La transition de la physique comme discipline savante vers la physique mathématique classique est largement engagée dans les années 1820 mais ce changement commence seulement à être introduit dans la discipline scolaire. Ampère, acteur majeur de cette transition à la fois en tant que savant et inspecteur général, utilise sa position dans le concours étudié pour modeler l'enseignement. Péclet, cofondateur de l'École centrale des arts et manufactures et examinateur de Galois, lui donne une nouvelle dimension.

**Mots-clés :** physique; histoire de l'éducation; Péclet; Ampère; Galois; École préparatoire; École centrale; Louis-le-Grand; manuels scolaires; dispositifs expérimentaux.

**Summary:** *In August 1829, Évariste Galois, a student at the Collège Royal Louis-le-Grand, composed the written exams for the École*

\* Merci à Norbert Verdier, mon collègue d'IUT et de laboratoire sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour, pour ses précieux conseils. Merci aux deux rapporteurs désignés par la rédaction de la *Revue d'histoire des sciences* pour leur lecture compréhensive et leurs suggestions extrêmement fructueuses de réorientation de ce travail.

\*\* Aurélien Gautreau, EST-GHDSO, Univ. Paris-Saclay, IUT de Cachan, 9 avenue de la division Leclerc, 94230 Cachan. Courriel : aurelien.gautreau@universite-paris-saclay.fr.

*Préparatoire. This was the only exam of the decade to include written physics questions. Galois had the advantage of having left behind works and archives that have been extensively studied and put into context, enabling us to situate the physics teaching he had received more precisely. The heuristic value of his copy is to shed light on the study of physics as a school subject in terms of its scholarly content, the variety of teaching methods and the institutions involved. The transition from physics as a scholarly knowledge to classical mathematical physics was largely underway by the 1820s, but this change was only just beginning to be introduced at school. Ampère, both a major player in this transition as a scientist and a general inspector, used his position in the studied exam to shape teaching. Péclet, co-founder of the École Centrale des Arts et Manufactures and Galois' examiner, gave it a new dimension.*

**Keywords:** physics; history of education; Péclet; Ampère; Galois; École Préparatoire; École Centrale; Louis-le-Grand; textbooks; experimental devices.

Mathématicien de génie<sup>1</sup>, icône républicaine<sup>2</sup> ou figure littéraire<sup>3</sup> : la mémoire collective d'Évariste Galois (1811-1832) est aussi riche que son œuvre est courte – moins de soixante pages publiées de son vivant ou immédiatement après sa mort<sup>4</sup>. Celle-ci peut être complétée par ses copies au concours d'entrée à l'École préparatoire<sup>5</sup>. En 2008 Caroline Ehrhardt a étudié la copie de mathématiques<sup>6</sup>. En 2017, Charles Alunni et Norbert Verdier ont commenté la copie de philosophie dans une série d'articles<sup>7</sup> au caractère « programmatique », prélude à l'étude des trois autres copies de latin, de français et de physique. « Sonde

1 - Caroline Ehrhardt, *Évariste Galois : La fabrication d'une icône des mathématiques* (Paris : Éditions de l'EHESS, 2011).

2 - Paul Dupuy, *La Vie d'Évariste Galois* (Sceaux : Gabay, 1903).

3 - Anne-Gaëlle Weber, Andrea Albrecht, Évariste Galois ou le roman du mathématicien, *Revue d'histoire des mathématiques*, 17/2 (2011), 403-435. Norbert Verdier, Rêver en équations, avec Évariste Galois (1811-1832), in Élisabeth Durot-Boucé (dir.), *Curios* (Rennes : TIR, 2021), 301-321.

4 - Ses œuvres complètes comportent 54 pages d'essais et mémoires, 188 pages de brouillons, 16 pages de lettres et 53 pages de manuscrits. Évariste Galois, *Écrits et mémoires mathématiques*, éd. critique par Robert Bourgne et Jean-Pierre Azra (Paris : Gauthier-Villars, 1976).

5 - Archives nationales F/17/4177 – qu'on désignera dans la suite par AN.

6 - Caroline Ehrhardt, Évariste Galois, un candidat à l'École préparatoire en 1829, *Revue d'histoire des mathématiques*, 14/2 (2008), 289-328.

7 - Évariste Galois, La copie d'Évariste Galois au concours d'entrée à l'École préparatoire, *Revue de synthèse*, 138 (2017), 367-391. Charles Alunni, Évariste Galois et sa dissertation de philosophie : Analyse textuelle, *ibid.*, 393-402. Charles Alunni, La Dissertation d'Évariste Galois : Un peu d'histoire philosophique, *ibid.*, 403-418. Norbert Verdier, Entrer à l'École préparatoire en 1829, *ibid.*, 419-444.

épistémologique» pour Alunni et Verdier, outil de décryptage des « pratiques d'enseignement » pour Ehrhardt, ces copies permettent un éclairage nouveau sur le cadre scientifique et institutionnel dans lequel il est formé. Notre article se situe dans cette continuité.

En 1829, Galois termine sa scolarité secondaire. Refusé deux fois à l'École polytechnique, il s'est résigné à se présenter à l'École préparatoire, jeune institution destinée à former des professeurs, qui a remplacé l'ancienne École normale fermée sous la réaction monarchique avant de devenir l'École normale supérieure<sup>8</sup> en 1830. Durant la deuxième quinzaine du mois d'août 1829, il a composé cinq épreuves écrites : mathématiques, version latine, discours français, philosophie et physique.

La copie de physique (voir fig. 1) est très courte et se termine par une faute de calcul. Malgré cette forme de légèreté, Galois est classé septième sur vingt-cinq candidats en section sciences, le correcteur ayant jugé qu'il s'était « trompé avec intelligence<sup>9</sup> ». Le sujet de philosophie du même concours portait sur la méthode scientifique et la rédaction de Galois permet de comprendre par quel prisme il aborde les cours de physique et d'en déduire, après cette correction de point de vue, une perspective plus générale sur la façon dont cette discipline était enseignée.

L'étude de cette copie et de son contexte apporte un éclairage singulier sur l'enseignement de la physique des années 1820 en France, et son établissement comme discipline scolaire. Notre propos n'est pas d'étudier l'évolution de la physique comme discipline savante, notamment la transition en cours vers la « physique mathématique classique<sup>10</sup> », mais d'apporter un éclairage sur le processus de disciplinarisation scolaire des évolutions de la science savante et de ses applications techniques. Les choix de contenus et de priorités dans les programmes, mis en évi-

8 - Jean-François Sirinelli (dir.), *École normale supérieure : Le livre du bicentenaire* (Paris : PUF, 1994). Craig Steven Zwerling, *The emergence of the École Normale Supérieure as a center of scientific education in nineteenth-century France* (New-York : Garland Pub., 1990).

9 - AN F/17/4174.

10 - Nous renvoyons à l'historiographie de Christian Gilain et Alexandre Guilhaud (dir), *Sciences mathématiques, 1750-1850 : Continuités et ruptures* (Paris : CNRS, 2015), part. I, qui discute la formation de cette discipline.

dence par l'examen des procès-verbaux des jurys du concours, constituent un matériau précieux pour la compréhension de la circulation des savoirs scientifiques.

Comprendre la désinvolture relative de Galois à l'égard de la physique implique de revenir sur le fond et la forme de l'enseignement de cette matière dans les collèges royaux : les sources archivistiques que nous mobilisons ici ne se limitent pas aux vingt-cinq copies de physique des candidats de 1829. Ces sources comprennent les documents écrits relatifs à l'organisation du concours durant ses quatre années d'existence de 1826 à 1829<sup>11</sup>. D'autres sources éclairent le fonctionnement des établissements secondaires. Un corpus de manuels permet d'étudier le contenu des enseignements ; enfin le recensement des instruments utilisés dans les démonstrations renseigne sur le déroulement pédagogique d'une séance.

Le fait que le concours de l'École préparatoire compte une épreuve de physique, contrairement à l'École polytechnique<sup>12</sup>, permet de mesurer les efforts déployés par les savants et éducateurs pour homogénéiser cet enseignement à l'échelle nationale. La transition de la physique comme discipline savante vers la physique mathématique classique est largement engagée dans les années 1820 mais ce changement commence seulement à être introduit dans la discipline scolaire. André-Marie Ampère (1775-1836), acteur majeur de cette transition à la fois en tant que savant et inspecteur général, utilise sa position dans le concours étudié pour faire évoluer l'enseignement. Jean-Claude Eugène Péclet (1793-1857), cofondateur de l'École centrale des arts et manufactures et examinateur de Galois, lui donne une nouvelle dimension.

11 - Les documents originaux et la plupart inédits cités tout au long de cette partie se trouvent aux Archives nationales et se répartissent dans les boîtes F/17/4172 à F/17/4177. Année 1826 : F/17/4172 ; année 1827 : 4173 ; année 1828 (organisation) : 4174 ; année 1828 (copies) : 4175 ; année 1829 (organisation) : 4176 ; année 1829 (copies) : 4177. Les cotes ne peuvent pas être plus précises : le contenu des cartons n'est pas trié par chemise. Les documents sont parfois mal classés par carton. Caroline Ehrhardt a déjà relevé ces anomalies (*op. cit.* in n. 6, note 4).

12 - L'épreuve de mathématiques du concours de l'École polytechnique a elle-même laissé peu de traces car elle consistait uniquement en un oral : Bruno Belhoste, La préparation aux grandes écoles scientifiques au XIX<sup>e</sup> siècle : Établissements publics et institutions privées, *Histoire de l'éducation*, 90 (2001), 101-130.



La copie de physique d'Évariste Galois

ACADÉMIE DE PARIS. CONCOURS GÉNÉRAL DE L'AN 1820.

(\*) Indiquer ici les nom et prénoms. (\*\*) Les élèves de la classe de Rhétorique indiquent s'ils sont vétérans. (\*\*\*) Placer ici la devise.

né le 12 an 18 à Paris département d Paris

Élève du Collège Condorcet (\*\*\*)

767.

1<sup>re</sup> Question. Un cloche cylindrique pleine d'air est sur une cuve à mercure, le niveau du métal intérieur est situé sur le prolongement du niveau extérieur, de sorte que la force élastique de l'air de la cloche est égale à celle de l'air environnant. La hauteur de la cloche est  $H$ , la pression est  $P$ ; on demande la valeur de la force élastique de l'air de la cloche, quand on la pousse vers d'une quantité  $A$ .

Soit  $h$  la hauteur de la cuve à mercure, soit  $t$  les surfaces respectives des parties de la cuve sous la cloche & hors de la cloche.

Appelons  $x$  la force élastique cherchée,  $y$  &  $z$  les hauteurs sous la cloche & hors de la cloche du mercure après l'opération indiquée.

La quantité d'air comprise sous la cloche après cette opération aura pour hauteur  $A + H + h - y$ . On aura donc la proportion

$$A + H + h - y : H :: P : x \quad (1)$$

puisqu'on suppose le volume d'air en raison inverse de la pression.

Ensuite, comme après l'opération, la pression supportée par le mercure sous la cloche,  $x$ , est hors de la cloche, toujours  $P$ , on aura

$$y : z :: P : x \quad (2)$$

Enfin le volume de mercure devant être le même avant & après l'opération, on aura nécessairement

$$ty + tz = h(z + t) \quad (3)$$

Éliminant entre ces trois équations  $y$  &  $z$ , on aura l'équation qui terminera  $x$ . Cette équation est

$$(A + H + h)t x^2 + [(A + H + h)z + PH]x = P^2 z + Ph(z + t)$$

Et comme les termes extrêmes sont de signe contraire, elle aura deux racines de signe contraire, dont la positive sera la valeur cherchée.

Répétition du numéro et de la devise.

Figure 1  
1<sup>er</sup> feuillet de la copie de physique de Galois. Source : Archives nationales F/17/4177.

## **Galois, élève du collège royal Louis-le-Grand confronté à la physique comme discipline scolaire**

La copie de physique de Galois, manuscrit inédit reproduit intégralement et commenté en annexe, est courte : un feuillet et demi pour une composition de six heures. La grande majorité des autres copies sont plus longues – certaines dépassent les dix pages. Le premier feuillet commence par l'énoncé, rédigé par Péclet<sup>13</sup>, auteur de plusieurs manuels et traités, et cofondateur de l'École centrale des arts et manufactures qui a ouvert ses portes le mois qui suit cette épreuve<sup>14</sup> :

« Une cloche cylindrique pleine d'air repose sur une cuve à mercure ; le niveau du métal intérieur est situé sur le prolongement du niveau extérieur, de sorte que la force élastique de l'air de la cloche est égale à celle de l'air environnant ; la hauteur de la cloche est  $H$ , la pression est  $P$  ; on demande la valeur de la force élastique de la cloche quand on la soulève d'une quantité  $A$ . »

Le second feuillet, censé répondre à la question de cours, « développez la théorie des vapeurs dans le vide », est un brouillon d'une dizaine de lignes. Le commentaire du correcteur, Péclet lui-même, est cinglant : « Solution presque nulle<sup>15</sup>. » Galois n'avait visiblement pas l'envie de se plier à cet exercice académique, qui occupe bien plus de place que la première question dans toutes les autres copies.

### **Les copies de physique de Galois et des vingt-quatre autres candidats**

Galois était un élève certes iconoclaste mais néanmoins scolaire et capable d'un certain conformisme, comme le montre

13 - Ancien élève de l'École normale, Péclet a enseigné huit ans au collège royal de Marseille. Il est nommé maître de conférences en physique à l'École préparatoire en 1828. Nous discutons plus loin les apports de Péclet, cofondateur d'une institution presque bicentenaire aujourd'hui, à la physique scolaire.

14 - AN, F/17/4176.

15 - AN, F/17/4174. Les commentaires de Péclet, qui a non seulement confectionné le sujet mais également corrigé les copies, sont nominatifs et expliquent le classement.

notamment sa composition de mathématiques<sup>16</sup>. Sa copie de physique atteste cependant d'un manque d'intérêt pour la matière – manque d'intérêt assez partagé parmi ses camarades de mathématiques spéciales candidats au concours de l'École polytechnique, bien plus prestigieux, qui ne comprenait pas d'épreuve de physique.

Néanmoins Galois semble se prendre au jeu de la première question, posée sous forme d'un exercice de physique mathématique, avec variables et équations, et non seulement comme une récitation du cours. Il introduit des variables supplémentaires afin de compléter les notations de l'énoncé (« soit  $h$  la hauteur primitive de la cuve à mercure », « appelons  $x$  la force élastique cherchée,  $y$  et  $z$  les hauteurs sous la cloche et hors de la cloche du mercure après l'opération indiquée<sup>17</sup> ») et il énonce correctement, mais sans la nommer, la loi de Mariotte sous la forme de l'égalité entre les rapports de volume et de pression de l'air contenu sous la cloche avant et après la détente<sup>18</sup> :

$$A + H + h - y : H :: P : x.$$

Il commet ensuite l'erreur d'appliquer cette même loi au mercure, qui n'est pas un gaz (« ensuite, comme après l'opération, la pression supportée par le mercure sera sous la cloche,  $x$ , et hors de la cloche, toujours  $P$ , on aura  $y : z :: P : x$ <sup>19</sup> »). Cette tentative de généralisation maladroite n'apparaît dans aucune autre copie.

Finalement, il combine les trois équations qu'il a posées pour en éliminer les variables inutiles mais son résultat n'est pas homogène. L'équation finale est doublement fautive : à cause de l'erreur de méthode déjà signalée, à laquelle il faut ajouter une faute de calcul. Galois ne se donne pas la peine de résoudre explicitement cette équation et termine par un commentaire qui le ramène dans sa zone de confort de résolution d'équations algébriques : « Et comme ses termes extrêmes sont de signes contraires, elle aura deux racines de signe contraire, dont la positive sera la valeur cherchée<sup>20</sup>. »

16 - Ehrhardt, *op. cit.* in n. 6.

17 - AN F/17/4177. La copie est reproduite et commentée en annexe I.

18 - Nous revenons plus loin sur l'usage de cette notation.

19 - AN F/17/4177.

20 - *Ibid.*

Malgré la désinvolture affichée de la copie, Péclet classe Galois septième sur les neuf candidats retenus<sup>21</sup> en précisant :

« La solution est inexacte mais cet élève avait considéré la question sous un point de vue plus général que les autres concurrents. Il s'est trompé avec intelligence<sup>22</sup>. »

Le major de physique, Charles François Honoré Pollet<sup>23</sup> (1811-1869), raisonne autrement : il prétend que la dépression créée dans la cloche égale le poids de mercure soulevé d'où, avec les notations de Galois et  $D$  la densité du mercure :  $x + D(y - h) = P$ . Le second, Antoine Jean-Baptiste Paul Trécourt<sup>24</sup> (1811-1853), fait le même raisonnement en ramenant directement  $D$  à 1. L'équation supplémentaire devient simplement  $x + (y - h) = P$ . Le rapport ci-dessus permet d'obtenir finalement une équation du second degré en  $x$  dont  $P$  est solution lorsque  $A = 0$ , confirmant que l'air reste à la pression atmosphérique si la cloche n'est pas soulevée.

La solution de la première question avancée dans les deux copies les mieux classées est qualifiée par Péclet de « simple et élégante<sup>25</sup> ». Le major explique le phénomène : le mercure « monte nécessairement dans la cloche puisque l'élasticité de l'air diminue. » Le second précise le formalisme : « Commençons par remarquer que  $P$  s'estime par la hauteur de la colonne de mercure, qui peut représenter cette valeur et que par conséquent on peut en retrancher une autre hauteur<sup>26</sup>. »

21 - Trois candidats sont non classés car soupçonnés d'avoir pu consulter des manuels pendant les épreuves et treize ne sont pas classés du fait de la médiocrité de leur composition.

22 - AN, F/17/4174. Le document est mal archivé dans la boîte qui correspond au concours de l'année 1828. Il a déjà été relevé par Ehrhardt, *op. cit.* in n. 6, qui l'a attribué par erreur à un jury d'oral d'admission à l'École.

23 - Major de la section sciences, Pollet a été professeur de physique et chimie au lycée d'Amiens. Il est cité dans Claudette Balpe, L'Enseignement des sciences physiques : Naissance d'un corps professoral (fin XVIII<sup>e</sup> – fin XIX<sup>e</sup> siècle), *Histoire de l'éducation*, 73 (1997), 49-85, 74, car il a donné des cours publics de chimie à Amiens en plus de ses cours au lycée. Verdier, *op. cit.* in n. 7, note 11, relève qu'il a publié une douzaine d'articles pour l'académie des sciences de la Somme et un manuel de chimie à l'usage des collèges en 1846.

24 - Trécourt est classé cinquième dans la section sciences, il a suivi la voie diplomatique et est devenu rédacteur au ministère des Affaires étrangères. Verdier, *op. cit.* in n. 7, note 10.

25 - AN F/17/4177.

26 - *Ibid.*

Suivant les copies, la pression est tantôt une «force élastique» mesurée en kilogrammes, d'autres fois «estimée» ou «représentée»<sup>27</sup> par la hauteur de mercure. La standardisation des réponses de candidats venus de lycées et d'académies différentes indique à quel point le problème semble classique, pas forcément dans sa formulation, nous y reviendrons plus loin, mais par le thème abordé. Cela témoigne d'un enseignement dominé par la physique des gaz : l'étude des baromètres et thermomètres, instruments de mesure mais aussi outils d'expérience permettant la manifestation de phénomènes physiques, est au cœur de tous les programmes et manuels. Cette homogénéité est compensée par une certaine variété des méthodes rédactionnelles.

Certains élèves, incapables de résoudre le problème par des équations, récitent des expériences similaires (une copie détaille sur trois pages le protocole expérimental célèbre de Edme Mariotte [1620-1684]) ou des lois numériques connues<sup>28</sup>. Le candidat classé sixième, Bisset<sup>29</sup>, parvient presque à la solution nonobstant une faute de calcul mais il propose une précision originale : «dans ce problème ainsi résolu la température est censée être à 0 ° sans quoi la colonne  $x$  de mercure ne varierait pas de  $x$  mais de  $x\left(1 - \frac{1}{5550}t\right)$ » où  $t$  est la température de l'air sous la cloche modifiée par la détente. Avant de conclure : «Ceci complique beaucoup le problème<sup>30</sup>.» Enfin, le candidat Lamache<sup>31</sup>, classé neuvième, rédige la solution sous la forme d'un protocole expérimental en concluant qu'il faut graduer la cloche pour obtenir la réponse au problème, témoignage de l'importance des démonstrations données pendant les cours de physique.

27 - AN F/17/4177.

28 - On trouve dans les copies de nombreuses valeurs numériques mémorisées par les candidats : la mesure de la «pression atmosphérique en hauteur de mercure» égale à 0,76 m, la masse (parfois appelée poids) d'un litre d'air de 1,299 g ou encore le rapport de «dilatation de l'air par degré» de 0,00375 de Gay-Lussac – valeur reprise dans tous les manuels parfois sous sa forme inverse égale à 267, dont Carnot a déjà déduit en 1824 l'existence théorique d'un zéro absolu avant que Thompson ne le formalise et l'estime à -273 °C. AN F/17/4177.

29 - Malgré nos recherches, nous ne sommes pas certains de l'identité de ce candidat.

30 - AN F/17/4177.

31 - Cf. AN F/17/4177.

Dans toutes les copies, sauf celle de Galois<sup>32</sup>, la question de cours est l'occasion de nombreux schémas dans la marge pour illustrer diverses expériences étudiées ou montrées en cours : celles de Mariotte, de Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), de John Dalton (1766-1844), etc. Ils représentent des baromètres, des thermomètres, des systèmes piston-cylindres (appelés parfois « corps de pompe<sup>33</sup> »).

### **Galois et l'enseignement de la physique à travers sa copie de philosophie**

La copie de philosophie de Galois à ce même concours nous aide à mieux comprendre son attitude face à l'épreuve de physique, afin de la comparer à celle de ses condisciples et d'en déduire quelques traits saillants de cette discipline scolaire naissante. Le sujet (« définir l'induction. Donner les règles de la méthode inductive<sup>34</sup> ») a permis à Galois de situer sa réponse exclusivement sur le terrain de la philosophie des sciences.

Alunni<sup>35</sup> a démontré le caractère « classique » de la question portant sur l'induction, par l'étude historique du contexte de l'enseignement de philosophie. L'inflexion libérale que représente la nomination d'Antoine Lefebvre de Vatimesnil (1789-1860) à la place du très réactionnaire Denis Frayssinous (1765-1841) au ministère de l'Instruction publique en 1828 se traduit par un changement de taille dans la discipline : elle n'est plus enseignée en latin mais en français, ce qui permet une plus grande liberté critique vis-à-vis de la réaction catholique, même si l'emprise cléricale reste très forte<sup>36</sup>.

L'examen de traités et manuels utilisés pour l'enseignement dans les collèges royaux confirme qu'une partie de la copie de Galois reproduit les définitions et conclusions du cours de philosophie classique. Le manuel de Beauclair de 1826, « dédié aux jeunes gens qui veulent parvenir au baccalauréat » introduit

32 - Ehrhardt, *op. cit.* in n. 6, relève cette même singularité dans la copie de mathématiques : « Contrairement à ce que l'on pouvait présager au vu de l'intitulé de la question, aucune courbe n'est jointe à la copie. »

33 - AN F/17/4177.

34 - *Ibid.*

35 - Alunni, *op. cit.* in n. 7.

36 - *Ibid.*

### *La copie de physique d'Évariste Galois*

« l'induction [comme] une autre sorte de raisonnement par lequel on va, de la connaissance de plusieurs choses particulières à la connaissance d'une vérité générale<sup>37</sup> ». Victor Cousin<sup>38</sup> (1792-1867), auteur, commentateur et traducteur de divers cours de philosophie et d'histoire de la philosophie<sup>39</sup>, dont l'influence éclectique ne s'exercera sur les programmes officiels qu'à partir de 1830, donc après la fin de la scolarité secondaire de Galois, indique dans un manuel paru en 1828 :

« Dans les sciences physiques l'induction repose sur la supposition de la constance des lois de la nature. [...] Un fait a lieu, et vous l'induisez, vous le transportez dans les temps à venir, vous prévoyez des faits identiques, vous affirmez que ce qui a lieu aujourd'hui aura lieu demain, que le soleil qui s'est levé aujourd'hui luira demain sur le monde. Quel est le fondement de cette induction ? La supposition inévitable de l'esprit que les lois de la nature sont constantes à elles-mêmes. »

On retrouve exactement le raisonnement dans la copie de Galois :

« Ce que les physiciens appellent physique expérimentale n'est autre chose que l'application de l'induction : tous les corps étant à notre connaissance inertes et pesants, il n'y a aucune raison de croire qu'ils ne le seront pas à l'avenir. »

De sorte que « l'induction paraît être la seule voie de communication de l'esprit avec le monde extérieur<sup>40</sup> ».

Dans son développement, Galois se livre à une véritable hiérarchisation des sciences, au critère de l'usage qu'elles sont tenues de faire de la méthode inductive. Ce long passage, qui constitue l'essentiel de sa copie, sort des sentiers battus scolaires et indique donc une pensée personnelle construite, confirmée par ses écrits ultérieurs.

37 - Beauclair, *Cours sommaire de rhétorique et de philosophie* (Rouen : N. Periaux, 1826). Nous n'avons pas trouvé d'information supplémentaire sur l'auteur.

38 - Victor Cousin est devenu une référence institutionnelle, lui qui considérait que « le professeur de philosophie est un fonctionnaire de l'ordre moral préposé par l'État à la culture des esprits et des âmes, au moyen des parties les plus certaines de la science philosophique ». Cité par Alunni et Verdier dans Galois, *op. cit.* in n. 7, 369.

39 - Victor Cousin, *Cours de philosophie. Introduction à l'histoire de la philosophie* (Paris : Pichon et Didier, 1828).

40 - AN F/17/4177.

Cette hiérarchisation de Galois est contemporaine de la « classification rationnelle [... des] sciences positives fondamentales <sup>41</sup> » exposée en cette même année 1829 par Auguste Comte (1798-1857) dans ses cours publics de philosophie <sup>42</sup> :

« Cet ordre est déterminé par le degré de simplicité ou, ce qui revient au même, par le degré de généralité des phénomènes, d'où résulte leur dépendance successive, et, en conséquence, la facilité plus ou moins grande de leur étude <sup>43</sup>. »

L'« échelle encyclopédique » déterminée par Comte s'ordonne de la manière suivante : « l'astronomie, la physique, la chimie, la physiologie, et enfin la physique sociale <sup>44</sup> ». Dans la copie de Galois, on devine l'ordre suivant : « astronomie », « physique générale <sup>45</sup> », « chimie », et « physiologie ». Mais toutes ces catégories sont réduites à faire usage de l'induction. Seules les mathématiques sont épargnées :

« Pour presque toutes les connaissances, l'induction est notre unique guide. Mais il est une classe de vérités qu'il est impossible d'en déduire. Ce sont les vérités mathématiques [...] Faut-il enfin juger l'induction ? Loin de la regarder comme une méthode qui fasse honneur à l'esprit humain, elle est plutôt faite pour nous rappeler la faiblesse de notre nature. Nous ne saurions nous en passer mais c'est un véritable pis-aller <sup>46</sup>. »

Le dédain de Galois pour la physique a donc, entre autres, pour cause un penchant philosophique renforcé par la façon dont cette discipline est enseignée : empreinte d'une métaphysique qui charrie une vision pourtant déjà dépassée des sciences physiques réduites à une collection de faits et d'expériences (ou plutôt de démonstrations d'expériences), sans lien entre la théorie physique, sa quantification mathématique et la méthode expérimentale.

41 - Auguste Comte, *Cours de philosophie positive*, t. 1 (Paris : Rouen Frères, 1830), 57.

42 - *Ibid.*, vi.

43 - *Ibid.*, 86-87.

44 - *Ibid.*, 96.

45 - Galois fait ce commentaire dans sa copie de philosophie : « Newton fait consister la physique "à démontrer une partie des phénomènes par expérience et à en déduire le reste par le raisonnement". Mais est-ce un véritable raisonnement que d'appliquer à tous les corps ce qu'on ne connaît que de quelques-uns ? » AN F/17/4177.

46 - *Ibid.*



Dans la seconde moitié des années 1820, le projet laplacien d'une « mécanique céleste » qui gouvernerait les lois de la matière est déjà entré dans une impasse<sup>47</sup>. La physique commence à être fondée comme science à caractère à la fois spéculatif et expérimental – à l'image de la mécanique newtonienne ou « astronomie » qui est souvent enseignée dans des manuels séparés.

Il ne s'agit pas dans cet article d'étudier les évolutions et ruptures en cours dans la physique comme science savante, notamment la consolidation de la « physique mathématique classique<sup>48</sup> », mais d'étudier le processus de disciplinarisation scolaire de ces transformations. Cette physique en transition est encore enseignée dans les années 1820 comme une « leçon de choses » pratiquée par des naturalistes de la matière inerte : longues descriptions d'expériences, accumulation de résultats empiriques souvent donnés avec six chiffres après la virgule.

Mais l'apparition dans la discipline scolaire d'un raisonnement physique appuyé sur l'outil mathématique est en cours – et pointe déjà dans les manuels<sup>49</sup> – ainsi que dans le sujet de 1829 posé par Péclet qui apparaît comme un exercice de modélisation et de mathématiques appliqué au domaine alors principalement expérimental de la théorie des gaz.

## **L'enseignement de la physique dans les collèges royaux sous l'inspecteur général Ampère**

La Révolution avait institué les Écoles centrales, l'Empire les a transformées en lycées, la Restauration leur a redonné le nom

47 - Robert Fox, The rise and fall of Laplacian physics, *Historical studies in the physical sciences*, 4 (1974), 89-136.

48 - Gilain, *op. cit.* in n. 10, part. I.

49 - Blondel et Wolff relèvent l'apparition précoce de la « physique mathématique » dans le domaine de l'électricité dans les manuels de référence : « Les traités de physique de Biot et de Haüy, références pour l'enseignement de la physique en France et dans quelques autres pays européens au début du XIX<sup>e</sup> siècle, oublient pour l'électricité la science de salon et ses expériences spectaculaires au profit des résultats numériques des expériences de Coulomb. » (Christine Blondel et Bertrand Wolff, Coulomb et la difficile gestion du « mélange du calcul & de la physique », in Gilain, *op. cit.* in n. 10, 318-349.) Ce n'est pas encore le cas pour la physique des gaz.

de collèges, en vigueur dans l'ancien régime, en distinguant les collèges royaux, qui reprirent le nom de lycées après 1848, des collèges communaux, qui, eux, sont devenus simplement « collèges ». Le programme de la première restauration (1814) a durement amputé l'enseignement scientifique, qui était pourtant déjà à la peine dans les lycées impériaux, pour revenir aux « humanités » classiques : latin, philosophie, morale. Après une nouvelle période de réaction contre les sciences en 1821<sup>50</sup>, les mathématiques sont de retour en seconde en 1826 : Galois en profite au second semestre à la faveur d'un redoublement. Il découvre « la fureur des mathématiques »<sup>51</sup>.

La physique est réintroduite en 1826 dans les deux dernières classes du lycée, la première et deuxième année de philosophie, ou « mathématiques spéciales » pour les disciplines scientifiques<sup>52</sup>. Le règlement du 16 septembre 1826 précise : « Nul élève ne pourra, sous aucun prétexte, être admis, pendant ces deux dernières années, aux leçons de mathématiques, s'il ne suit en même temps les cours de physique »<sup>53</sup>. Le manque d'intérêt pour la physique est dû en premier lieu à l'absence de cette matière au concours d'entrée de l'École polytechnique jusqu'en 1846. Galois ayant « sauté » la première année de philosophie, il n'a bénéficié que d'un an de cours de physique.

Néanmoins les copies du concours, même celle de Galois, montrent que les élèves des collèges royaux étudient la physique. Pour comprendre comment cet enseignement était conçu, nous suivrons une démarche pragmatique : programme officiel, examen d'un corpus de manuels recommandés par l'institution et enquête sur les instruments de laboratoire utilisés durant les séances.

Le déroulement des cours lui-même est difficile à connaître.

50 - Bruno Belhoste, *Les Sciences dans l'enseignement secondaire français : Textes officiels*, t. 1 : 1789-1914 (Paris : Institut national de recherche pédagogique, 1995), 28.

51 - Dupuy, *op. cit.* in n. 2, 24.

52 - Les mathématiques spéciales sont à la fois une discipline scolaire et une classe (encore appelée deuxième année de philosophie en 1829). Actes de la journée « Deux siècles de mathématiques spéciales » organisée le samedi 19 mai 2012 par Roland Brasseur et Norbert Verdier au lycée Louis-le-Grand, 1<sup>re</sup> partie, *Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales*, 241 (janvier 2013), 29-55.

53 - Belhoste, *op. cit.* in n. 50.

Mais l'emploi du temps donne quelques indications : « Deux heures de cours consécutives ont lieu le matin et le “soir” (après-midi). Les lycéens effectuent l'essentiel de leur travail après les cours, dans les salles d'études<sup>54</sup>. » Les programmes officiels exigent deux séances de physique, donc quatre heures de cours hebdomadaires. La classe de mathématiques spéciales de Galois compte 118 élèves<sup>55</sup> : dans ces conditions, le cours ne pouvait être que magistral, accompagné de démonstrations expérimentales exécutées exclusivement par le professeur<sup>56</sup>.

L'appréciation de Louis Jacques Sylvestre Thillaye<sup>57</sup> (1776-1860) à propos de Galois est connue : « travail nul<sup>58</sup> ». Mais que dire de la qualité des cours du seul et unique professeur de physique du jeune mathématicien en formation ? Ses rapports d'inspection<sup>59</sup>, archives que nous mobilisons ici pour la première fois, sont tous également mauvais au long de sa carrière : « On le trouve trop faible en mathématiques et en physique, peu au courant de la science. Il fait bien, dit-on, les expériences, mais n'emploie pas aussi heureusement le calcul. »

Dans un de ses derniers rapports, l'inspecteur général Ampère émettait le même jugement :

« L'enseignement de la physique [de Thillaye] manque de préci-

54 - Les élèves plus fortunés ne font pas leur étude du soir à Louis-le-Grand mais dans des institutions privées payantes où ils bénéficient d'une aide supplémentaire et de conditions de logement et de restauration meilleures que dans les internats publics. Jean Bastianelli, Jeanne Weber (dir.), *Lycée Louis-le-Grand* (Thionville : Gérard Klopp, 2019).

55 - 97 des 118 condisciples de Galois étaient scolarisés dans des institutions privées en plus du collège royal – mais pas Galois lui-même : Olivier Courcelle, *Les condisciples de Galois en maths spé, Images des mathématiques*, 2016, <https://images.math.cnrs.fr/Les-condisciples-de-Galois-en-Maths-spe.html#nh2>.

56 - Bruno Belhoste arrive aux mêmes conclusions dans sa description de l'enseignement en mathématiques spéciales dans les années 1830 : « Il nous manque malheureusement des informations précises sur le déroulement de ces cours. Devant un auditoire aussi nombreux, l'enseignement est principalement magistral. Les rapports des inspecteurs et du proviseur de Saint-Louis pour les années 1830 et 1840 permettent au moins de savoir ce qu'on attend du professeur. À propos de Delisle, les qualités que l'on vante sont la clarté d'exposition, la discipline parfaite régnant dans sa classe et la grande régularité dans l'ordre et la succession des travaux. » Belhoste, *op. cit.* in n. 12.

57 - Thillaye est reçu docteur à Paris en 1803, il devient conservateur des Musées de la Faculté de médecine, Membre de l'Académie de médecine (1823-1860) et auteur de différents traités de chimie industrielle.

58 - Dupuy, *op. cit.* in n. 2, 27.

59 - AN F/17/21783.

sion : les élèves en général n'ont que des idées vagues et qui ne se tient [*sic*] pas entre elles. Nous craignons que le professeur ne continue à trop précipiter sa marche et à ne pas se régler assez dans son exposition des faits et des théories vers l'intelligence de ceux qui l'écoutent<sup>60</sup>. »

Inspecteur général de 1811 à sa mort en 1836, Ampère incarne la « double vocation<sup>61</sup> », scientifique et institutionnelle, de ce corps. Savant en exercice, il a néanmoins continué ses tournées d'inspection au mépris de sa santé et malgré ses nombreux démêlés avec l'institution : « Il fut mis à pied deux fois, en 1815 du 20 février au 15 août, puis du 26 octobre 1824 jusqu'au 2 mai 1828<sup>62</sup>. » En plus de ses tournées d'inspection qui lui permettaient à la fois d'adapter et d'homogénéiser des pratiques d'enseignement au niveau national, Ampère était examinateur de concours et chargé d'évaluer des manuels. En presque trois décennies, il a contribué au processus de disciplinarisation scolaire de la physique en particulier – même si ses compétences savantes et administratives ne se limitaient pas à cette matière. Il a promu et façonné une méthode d'enseignement, « parfaitement consciente ». Pour lui, « il ne s'agit pas tant de faire adopter les déductions déjà faites que de rendre l'esprit capable d'en faire de nouvelles<sup>63</sup> ».

### **La physique comme discipline scolaire à travers un corpus de manuels**

La façon d'enseigner la physique de Thillaye est à la fois conforme aux usages et aux programmes, et en même temps l'objet de critiques précises, notamment de la part d'Ampère, qui regrette l'absence d'une exposition plus systématique et théorique. Cette tension traduit les transformations en cours de l'enseignement des sciences physiques.

Le 1<sup>er</sup> avril 1828, les programmes du cours de sciences physiques

60 - AN F/17/21783.

61 - Guillaume Richard, Parcourir l'espace national : Les voyages d'inspection des facultés de droit au XIX<sup>e</sup> siècle, *Clio@Themis*, 22 (2022), <https://doi.org/10.4000/cliiothemis.2034>.

62 - André Warusfel, André Marie Ampère (1775-1836), in Jean-Pierre Rioux (dir.), *Deux cents ans d'inspection générale (1802-2000)* (Paris : Fayard, 2002), 57.

63 - Louis de Launay, *Le Grand Ampère d'après des documents inédits* (Paris : Perrin, 1925), 247.

pour les élèves des deux années de philosophie<sup>64</sup> sont renouvelés par règlement du ministère de l'Instruction. La physique des gaz (pression, température, densité) y apparaît centrale, regroupant une majorité des thèmes abordés et se diffusant dans différentes parties du cours<sup>65</sup>. Cette centralité sera confirmée plus loin par notre analyse quantitative des sujets posés au concours de l'École préparatoire. Le programme comprend dès la première année une introduction à la physique du son et à la météorologie, ces phénomènes complexes étant mobilisés pour montrer l'utilité de l'étude des gaz. On retrouve ces références classiques dans les copies des candidats<sup>66</sup> et dans les ouvrages savants de l'époque (notamment dans l'ouvrage de Sadi Carnot<sup>67</sup> [1796-1832] en 1824).

D'après Ehrhardt, l'examen des manuels scolaires est un des outils pour établir une « tradition savante<sup>68</sup> », dont elle a analysé le maillage mathématique pour le cas Galois. Appliquer la même démarche à propos de la physique implique de recenser les manuels recommandés dans les programmes officiels. Nous nous limitons ici à un aperçu partiel non exhaustif d'un corpus de manuels dont nous pouvons supposer que Galois a pu les consulter, en nous fondant sur les archives du concours et sur la biblio-

64 - Belhoste, *op. cit.* in n. 50, 115.

65 - Cet extrait du « Programme du cours de la seconde année » montre l'importance de la physique de la chaleur dans toutes les parties du cours : « Développements sur les phénomènes produits par l'action de la chaleur : ... Divers moyens de mesurer la dilatation des gaz... Instruments et méthodes pour déterminer les chaleurs spécifiques... Développements sur les phénomènes produits par la gravité : ... Mesure des hauteurs par le baromètre... Relation entre le volume, la pression et la température d'un gaz sec / humide. Développements sur la météorologie. » Belhoste, *op. cit.* in n. 50, 119.

66 - La référence à la météorologie apparaît dans plusieurs copies de 1829, notamment dans celle du major de physique, Pollet : « À peine l'orage a-t-il cessé que les eaux qui couvraient la surface de la terre disparaissent entièrement. Ce n'est pas qu'elles se soient insinuées dans la terre, car si on met de l'eau dans un vase et qu'on l'expose à l'air vif pendant un certain temps, on ne retrouve plus dans le vase que les sels que l'eau tenait en dissolution. Mais cette vaporisation de liquide dans l'air n'est pas instantanée, elle ne se produit instantanément que dans le vide. » AN F/17/4177.

67 - Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Paris : Bachelier, 1824).

68 - Caroline Ehrhardt, *Évariste Galois : La fabrication d'une icône mathématique* (Paris : EHESS, 2011), 55.

thèque du laboratoire de physique de Louis-le-Grand<sup>69</sup>.

Le *Traité élémentaire de physique* de René-Just Haüy<sup>70</sup> (1743-1822), produit sur commande de la commission chargée de désigner les livres à l'usage dans tous les lycées le 10 avril 1803, sert d'étalon à tous les suivants, comme le souligne Nicole Hulin<sup>71</sup> : « Publié en 1803, l'ouvrage est réédité sous l'Empire en 1806 puis sous la Restauration en 1821<sup>72</sup>. » Il suit le plan des leçons à l'École normale de l'an III<sup>73</sup>, ancêtre de l'École préparatoire, créée à Paris en 1794 pour former des enseignants. Les rééditions permettent la survivance des idées de la période révolutionnaire sur la place de l'expérience en physique dans la réaction impériale puis monarchique. Le *Traité* de Haüy évolue à chaque édition pour coller au plus près des découvertes scientifiques récentes, pas seulement en y ajoutant de nouvelles expériences mais en reformulant les doctrines dépassées<sup>74</sup>.

Ce manuel fondateur n'est cependant pas conservé dans la bibliothèque de Louis-le-Grand. On y trouve le *Précis élémentaire de physique expérimentale*<sup>75</sup> de Jean-Baptiste Biot (1774-1862), un ouvrage recommandé par la commission de l'instruction

69 - De futurs travaux pourraient compléter le corpus de manuels de physique, que nous avons ici sélectionnés pour leur rapport avec le contexte scolaire de l'élève Galois. Le Sudoc recense neuf manuels scolaires consacrés exclusivement à la physique (et deux manuels généralistes qui contiennent de la physique) publiés entre 1825 et 1830, dont ceux que nous avons mentionnés dans cet article. L'un d'entre eux fait partie de la collection encyclopédique Roret. Un autre Roret se rapporte à la physique mais sous forme de loisirs non scolaire, intitulé « Récréations ».

70 - René-Just Haüy, *Traité élémentaire de physique*, 2<sup>de</sup> éd. (Paris : Coursier, 1806 [1<sup>re</sup> éd. 1803]).

71 - Nicole Hulin, *L'Enseignement secondaire scientifique en France d'un siècle à l'autre : 1802-1980* (Lyon : Institut national de recherche pédagogique, 2007).

72 - Nicole Hulin, De l'enseignement de la physique, in Francis Gires (dir.), *Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique du XVIII<sup>e</sup> au milieu du XX<sup>e</sup> siècle* (Niort : ASEISTE, 2016), 34.

73 - Nicole Hulin, René-Just Haüy : Des leçons de l'an III au *Traité élémentaire de physique*, *Revue d'histoire des sciences*, 50/3 (1997), 243-64.

74 - Hervé Grau, « L'Enseignement des sciences physiques et l'expérimentation en France 1750-1830 », thèse de doctorat (EHESS, 2020), 117-119.

75 - Jean-Baptiste Biot, *Précis élémentaire de physique expérimentale* (Paris : Deterville, 1817).

publique en 1817<sup>76</sup>, ainsi que l'*Essai d'un cours élémentaire et général des sciences physiques* par François Sulpice Beudant<sup>77</sup> (1787-1850), «adopté par le conseil royal de l'instruction publique dans les collèges royaux» en 1821. Ce dernier manuel semble peu adapté au niveau requis par les programmes de mathématiques spéciales, il est conçu comme une introduction aux sciences et l'avant-propos précise qu'y sont présentés des «phénomènes que les jeunes gens rencontrent au milieu même de leurs jeux».

Galois a plus probablement étudié dans le *Traité élémentaire de physique* par César-Mansuète Despretz<sup>78</sup> (1791-1863), manuel mentionné avec ceux de Haüy et Biot par Françoise Khantine-Langlois<sup>79</sup>. Cet ouvrage réédité en 1827 avait été adopté par le conseil royal de l'instruction publique pour l'enseignement dans les établissements de l'université, mais il était vraisemblablement largement utilisé dans les classes de philosophie ou mathématiques spéciales. L'auteur y a retranscrit son cours au collège royal Henry-IV. Lors de l'épreuve de physique de 1829, Pécelet accuse trois étudiants de trois académies différentes d'avoir composé avec ce livre sous les yeux<sup>80</sup>. Ces trois copies

76 - L'ouvrage recommandé est plus simple dans sa présentation que le *Traité de physique expérimentale et mathématique*, édité en 1816, mais qui n'est pas destiné à l'enseignement. Ce dernier traité utilise bien plus d'équations que le *Précis*, même si elles se limitent à des égalités entre rapports, d'où l'addition du qualificatif «mathématique». Jean-Baptiste Biot, *Traité de physique expérimentale et mathématique* (Paris : Deterville, 1816).

77 - François Sulpice Beudant, *Essai d'un cours élémentaire et général des sciences physiques*, 2<sup>de</sup> éd. (Paris : Verdière, 1821). Beudant est signataire d'une lettre collective demandant la réintégration d'Ampère comme inspecteur général le 28 avril 1828 (Archives Ampère, carton 20, chemise 306, image 2. Dans la suite nous désignerons les archives Ampère par AA/carton/chemise/image. Toutes sont en ligne sur la plateforme *Ampère et l'histoire de l'électricité* à l'adresse <http://www.ampere.cnrs.fr/manuscripts/parcourir/>).

78 - Despretz a été répétiteur de chimie à l'École polytechnique en 1818 puis professeur de physique en mathématiques spéciales au collège royal Henri-IV en 1824. Il a continué sa carrière à la faculté des sciences de Paris et à l'Académie des sciences qu'il a présidée en 1858. César-Mansuète Despretz, *Traité élémentaire de physique*, 2<sup>de</sup> éd. (Paris : Méquignon-Marvis, 1827). D'après *La Bibliographie de la France* (Paris : Didot, 1825), 189, la première édition date de 1825.

79 - Françoise Khantine-Langlois, Les appareils dans les livres d'enseignement de la physique, in Francis Gires (dir.), *Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique du XVIII<sup>e</sup> au milieu du XX<sup>e</sup> siècle* (Niort : ASEISTE, 2016).

80 - Trois copies sont recalées par Pécelet, les «élèves ayant eu des ouvrages de physique à leur disposition». Dans un commentaire nominatif, Pécelet précise : «plusieurs passages sont copiés sur la physique de M. Despretz», F/17/4175.

ont peine à traiter le problème posé mais ont reproduit des passages entiers du manuel pour répondre à la question de cours, schémas inclus. La plus courte est longue de dix pages. Contrairement à la copie du major Pollet, qui est aussi longue et contient aussi de nombreux schémas, elles reproduisent des formules basées sur des constantes exprimées jusqu'à la sixième décimale, une des caractéristiques des manuels du corpus étudié. Dernier indice, on retrouve dans la copie de Galois, ainsi que dans toutes les copies classées sauf deux, la notation  $A : B :: C : D$  pour indiquer l'égalité de deux rapports, soit  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$ . Parmi les manuels de physique recommandés, seul celui de Despretz utilise cette notation.

La physique connaît alors une double évolution disciplinaire : l'introduction de l'expérience et la mathématisation. L'apparition dans l'enseignement de ces deux évolutions parallèles mais simultanées peut toutefois être légèrement décalée<sup>81</sup>. Haüy insiste dès 1803 sur les vertus de l'expérience pour en finir avec la physique comme de « système »<sup>82</sup> mais il utilise très peu les mathématiques. Despretz fait de même en 1827 et oppose l'expérience, sa description et son analyse, à la « scholastique »<sup>83</sup>. La nouveauté est qu'il introduit des calculs et modélisations mathématiques plus poussés, mais les relègue aux notes.

Ampère a été sollicité par le ministère pour évaluer les manuels scolaires, notamment de physique, même pendant les quelques années où il est écarté de l'inspection. On retrouve dans ses archives des lettres du ministère pour réclamer l'examen d'un ouvrage<sup>84</sup>, notamment les traités de Despretz et de Péclet, et cer-

81 - Claudette Balpe, Expérience, démonstration et instrumentation dans les lycées au XIX<sup>e</sup> siècle, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 845 (2002), 1131-1146.

82 - « Il y a loin du système à la théorie. » Haüy, *op. cit.* in n. 70, VIII.

83 - Despretz, *op. cit.* in n. 78, III.

84 - Le ministère demande par exemple à Ampère d'évaluer un manuel de chimie de Despretz en 1832 (AA/20/302/131) ou encore le traité élémentaire de physique de Péclet la même année (AA/20/307/339). Son évaluation d'un manuel de physique en 1825 consiste en quinze pages de corrections précises et motivées et se termine par : « Si nous nous sommes attachés à relever ainsi les passages qui montrent combien l'auteur a peu travaillé les matières pour lesquelles il commet des erreurs, c'est que nous sommes convaincus qu'une nouvelle édition serait éminemment utile dans l'enseignement. » AA/20/307/247 : l'ouvrage évalué, G.-F. Olivier, *Themata de physica* (Paris : Maire-Nyon, 1823), est recensé dans la *Bibliographie de la France*, 3 janvier 1824, 340. Il consiste en des « thèmes pour la physique » en français destinés à être traduits en latin.



taines de ses réponses.

### **Les démonstrations d'expériences dans les cours de physique au collège royal**

Si l'introduction des mathématiques est plus progressive, la méthode expérimentale est à l'honneur dans les cours de physique des années 1820. Ampère a souvent insisté sur « la nécessité de l'expérience dans les cours de physique » :

« Il est impossible d'y suppléer par de simples descriptions ou figures qui exigent plus d'attention à elles seules pour être comprises que l'explication des phénomènes. Les élèves ne peuvent prendre aucun intérêt à de simples récits<sup>85</sup>. »

Néanmoins, il ne s'agit pas d'organiser des travaux pratiques. Ceux-ci ne seront pas introduits dans les programmes officiels avant le <sup>xx</sup>e siècle, bien que certains enseignants mettent en œuvre des séances de ce type, comme Beudant qui en parle dans l'introduction de son manuel :

« J'ai tâché d'habituer les jeunes gens à construire eux-mêmes, à peu de frais et avec tout ce qui se trouve habituellement sous leurs mains, tous les appareils propres à remplir leur objet, comme étant un moyen de faire, dans tous les temps, dans tous les lieux, un grand nombre de recherches, qui seraient souvent impossibles s'il fallait employer des appareils dispendieux, comme un grand nombre de ceux qu'on voit briller dans nos cabinets de physique<sup>86</sup>. »

À l'opposé, le ministère préconise des démonstrations durant les cours, qui ont pour but de présenter les instruments qui composent les cabinets dans les collèges royaux : une circulaire de 1821 propose une liste de 102 dispositifs pour les démonstrations de physique, en y joignant le nom du fabricant et le prix d'achat conseillé<sup>87</sup>. Les collèges royaux sont loin de tous acquérir cette centaine d'instruments. Ampère a transmis en 1835 les demandes de la faculté de Toulouse : « il fallait d'urgence acheter un héliostat et des boussoles » mais « le montant de l'allocation

85 - AA/20/302/87.

86 - Beudant, *op. cit.* in n. 77, II-III.

87 - Belhoste, *op. cit.* in n. 50, 98-101.

annuelle accordée pour l'achat du matériel s'élevait à 600 francs, alors que, selon les professeurs, il en aurait fallu 6 000<sup>88</sup> ». Il n'est pas le seul inspecteur dans les années 1820 et 1830 à constater cette « situation assez désolante : en divers endroits, les collections, quand elles existent sont plutôt entassées qu'exposées en raison de l'insuffisance des locaux<sup>89</sup> ».

Le musée de physique du lycée Louis-le-Grand<sup>90</sup> permet cependant de confirmer que nombre de ces instruments ont effectivement été acquis par l'établissement. En l'absence de registre, il est impossible de connaître la date d'achat de ces dispositifs. Mais nous avons pu les identifier grâce à leur description dans *L'Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique*<sup>91</sup> et constater que le fabricant est systématiquement celui qui est conseillé dans la circulaire de 1821 : Pixii, Frécot, Gambey, Fortin, Soleil ou Breguet. Il est raisonnable de supposer que l'élève Galois en a vu au moins une partie en action lors de l'année scolaire 1828-1829.

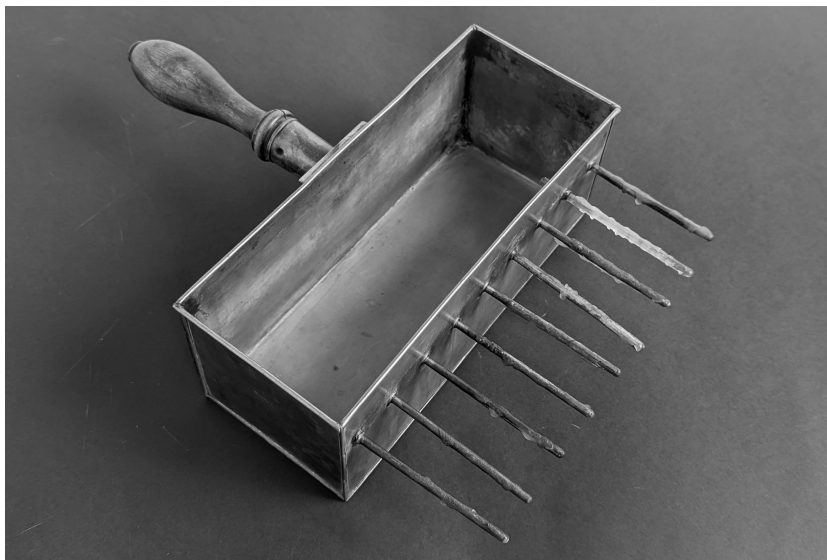
Le cours de physique auquel a assisté Galois prenait certainement la forme d'une lecture magistrale où l'enseignant décrivait devant les 118 élèves un dispositif à même de mettre en évidence ou de mesurer un phénomène, démonstration à l'appui : machine d'Attwood pour la pesanteur, marmite de Papin pour la relation entre pression et température des gaz, baromètres de Fortin, appareils pour la dilatation des solides (en l'occurrence ce sont les anneaux de Gravesande et un dilatomètre à cadran, appelé aussi pyromètre à levier), appareil pour montrer le maximum de densité de l'eau (en l'occurrence un appareil de Van Hope), machine à diviser le verre (pour graduer un thermomètre centigrade), appareil pour montrer l'inégale conductivité de la chaleur (en l'occurrence un appareil d'Ingenhousz, voir fig. 2), thermomètre de Leslie (en l'occurrence un thermoscope de Rum-

88 - Cité dans Guy Caplat, Bernadette Lebedeff-Choppin, *L'inspection générale de l'enseignement supérieur au XIX<sup>e</sup> siècle* (Paris : Institut national de recherche pédagogique, 2002), 115-116.

89 - *Ibid.*, 11.

90 - Le musée de physique de Louis-le-Grand est abrité dans une pièce du laboratoire de physique. Il a été fondé en 1973 par Pierre Provost (1922-2006) et est aujourd'hui conservé par Sylvie Dancre, professeure émérite de physique en mathématiques spéciales.

91 - Francis Gires (dir.), *Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique du XVIII<sup>e</sup> au milieu du XX<sup>e</sup> siècle* (Niort : ASEISTE, 2016).



**Figure 2**

*« Appareil d'Ingenhousz pour ordonner la conductivité thermique des différents matériaux. Les différentes tiges étaient recouvertes de cire. Une de leurs extrémités plonge dans la "casserole" remplie d'eau chaude. À un instant donné, la cire a fondu d'autant plus loin de la casserole que le matériau est meilleur conducteur thermique. »  
(lycée Louis-le-Grand)*

ford). Tous ces instruments présents à Louis-le-Grand sont décrits avec force détails dans les manuels scolaires.

Les copies du concours qui ont répondu à la question de cours (toutes celles qui ont été classées sauf celle de Galois) fourmillent de descriptions d'expériences<sup>92</sup> accompagnées de schémas représentant de nombreux dispositifs : « cloches cylindriques », « tubes barométriques », « cornue tubulée », « serpentins », « thermomètres » ou « colonne de mercure<sup>93</sup> ». Ces expériences ont-elles été uniquement étudiées dans les manuels et décrites à l'oral par le professeur ou bien été effectuées devant la classe ? Difficile à dire, mais il est certain que les instruments étaient au centre de l'enseignement de la physique. La lecture

92 - « Procédé de Dalton pour déterminer la force élastique de la vapeur d'eau », « détermination de la densité de vapeur d'eau d'après M. Gay-Lussac », etc. AN F/17/4177.

93 - AN F/17/4177.

des manuels des années 1820 comme des copies du concours de 1829 montre un écueil dans lequel l'enseignement de la physique était tombé, et qui sera résumé des années plus tard en 1854 par le chimiste Jean-Baptiste Dumas (1800-1884), cofondateur de l'École centrale des arts et manufactures en 1829 avec Péclet :

« Presque toujours, ces appareils offrent des dispositions accessoires compliquées, sur lesquelles l'attention des élèves s'égare et qui les distraient de l'objet essentiel de la démonstration. Insensiblement, on en est venu parfois à subordonner la pensée qu'il s'agit de faire entrer dans l'esprit des élèves à l'appareil qui devrait en être seulement la traduction matérielle ou la vérification<sup>94</sup>. »

La méthode expérimentale, appuyée sur l'outil mathématique, par opposition à la démonstration ou description des phénomènes, a tout juste commencé à pénétrer la physique scolaire. La formation des enseignants, qui commence par leur recrutement à l'École préparatoire, est aux avant-postes de ce changement.

Pour Ampère, qui en est responsable, l'épreuve de physique au concours de l'École préparatoire est à la fois une sonde unique pour mesurer la pénétration des programmes nationaux dans les collèges royaux, mais aussi une occasion d'en ajuster la teneur et de définir des perspectives nouvelles.

### **Le concours de l'École préparatoire dans l'institution d'un enseignement de physique**

L'enseignement de la physique en tant que discipline est en pleine construction. Le concours de l'École préparatoire est utilisé par ses organisateurs – qui sont aussi des savants en exercice – comme un outil pour cette production.

L'École préparatoire est fondée par une ordonnance royale du 9 mars 1826 qui la destine à « former des sujets pour les différentes fonctions de l'instruction publique<sup>95</sup> ». Elle remplace le pensionnat normal, dissous en 1822 par le très réactionnaire Frayssinous,

94 - Cité par Hulin, *op. cit.* in n. 72, 28.

95 - AN F/17/4172.

et deviendra l'École normale supérieure<sup>96</sup> après les journées de 1830, sous Louis-Philippe.

L'histoire institutionnelle systématique de l'École préparatoire n'a pas encore été écrite<sup>97</sup>. Dans leurs articles respectifs déjà cités, Ehrhardt et Verdier ont dégagé quelques faits saillants<sup>98</sup>. Pour apporter une pierre supplémentaire à cet édifice, en se focalisant particulièrement sur les épreuves de physique, nous avons étudié tous les documents originaux des Archives nationales relatifs au concours durant ses quatre années d'existence<sup>99</sup>.

Comme l'a observé Ehrhardt, le classement final des candidats en sciences dépend presque exclusivement de leur rang à l'épreuve de mathématiques<sup>100</sup>. Cette sélection des candidats est bien loin de se limiter à l'évaluation des épreuves d'examen : proviseurs de collèges royaux et recteurs d'académie sont sollicités pour motiver des avis sur la famille et le rang social des candidats, jusqu'aux opinions politiques et religieuses de leurs parents. La sélection des futurs enseignants est sociale et politique en plus d'être scolaire.

Le concours, de même que la scolarité des candidats reçus à l'École préparatoire, se divise en deux filières : lettres et sciences. La spécialisation entre les différents enseignements scientifiques est décidée à l'issue des années d'École. Il n'y a donc pas de recrutement spécifique pour la physique bien qu'il y ait une épreuve de physique.

L'année 1828 voit un nouveau changement dans l'admission à l'École avec l'apparition d'un examen oral de vérification tenu lors de la semaine de la rentrée au mois de novembre. Ce changement, lié à la volonté d'affiner le recrutement, est décidé par Ampère après qu'il a jugé sévèrement l'organisation des épreuves de

96 - Jean-François Condette, *Histoire de la formation des enseignants en France : XIX<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècles*, (Paris : Harmattan, 2007). Pascale Hummel, Histoire administrative de l'École normale supérieure, in *Pour une histoire de l'École normale supérieure : Source d'archives 1794-1993* (Paris : Éditions Rue d'Ulm, 2013), 13-15.

97 - Cela mériterait une étude à part entière à partir des nombreuses sources archivistiques mobilisées ici.

98 - Verdier, *op. cit.* in n. 7.

99 - AN F/17/4172 à F/17/4177. Cf. n. 11 *supra*.

100 - Ehrhardt, *op. cit.* in n. 6.

physique par l'abbé Alexis Marin Pinault <sup>101</sup> (1794-1870).

### **Ampère et la sélection des futurs enseignants de physique**

L'existence d'une épreuve de physique au concours de l'École revêt une importance particulière : des années avant la différenciation de l'agrégation et du baccalauréat entre mathématiques et physique, le concours de l'École préparatoire est le seul étalon auquel mesurer les progrès de cet enseignement dans chaque académie.

Ampère a supervisé non seulement l'examen de physique mais la formation et l'évaluation des élèves de l'École durant son éphémère existence. Il n'a pas hésité à intervenir directement auprès du ministre sur la base d'un procès-verbal de jury ou d'un rapport de concours, comme dans cette lettre du 17 septembre 1826 :

« J'ai remarqué que non seulement les élèves venus du collège de Cahors n'ont pas traité la seconde question, qui ne l'avait pas été encore, à ce qu'il paraît, dans le cours qu'ils ont suivi, mais encore que la première l'était très mal par ces élèves, il y avait des erreurs qu'ils répètent presque tous, ce qu'on doit peut-être attribuer à la manière dont ils ont été enseignés. On trouve aussi une erreur sur la prétendue absorption des gaz par le mercure, dans presque toutes les copies des élèves du collège royal d'Amiens, qui n'est dans aucune autre copie et qu'il faut probablement rapporter à la même cause <sup>102</sup>. »

Dès la première année, Ampère et les institutions qu'il représente utilisent le concours d'entrée à l'École de formation des professeurs pour harmoniser l'enseignement et les programmes du secondaire au niveau national.

Ampère ne peut pas tout faire et dès 1827, la direction de l'instruction publique lui a cherché un remplaçant pour rédiger le su-

<sup>101</sup> - Pinault est agrégé en mathématiques élémentaires en 1816, ordonné en 1827, il entre maître de conférences en physique à l'École préparatoire la même année et la quitte en 1828. Il termine sa carrière comme professeur de physique au séminaire d'Issy et a publié plusieurs manuels. Un brouillon du directeur de l'instruction publique indique que l'abbé était initialement désigné pour corriger les vingt copies de physique de 1827, mais il est barré et remplacé par Ampère (AN F/17/4173).

<sup>102</sup> - AN F/17/4172.

jet et corriger les copies<sup>103</sup>. Mais rien n'indique qu'elle l'a trouvé. Après l'examen intégral des archives disponibles, nous pouvons supposer qu'Ampère est le rédacteur des sujets de 1826 et 1827. En 1828, l'abbé Pinault a rédigé le sujet qu'Ampère a corrigé.

Mais la piètre qualité des questions posées, d'ailleurs transmises sous une forme de quasi-brouillon, a poussé Ampère à annuler les épreuves écrites de physique et à inaugurer un oral d'admission :

« Les deux questions étant spéciales, on ne peut rien conclure de la manière dont elles sont résolues relativement aux connaissances des candidats sur l'ensemble de la physique. Un élève qui comme Louis Chauchot énonce et explique en détail ce qu'on peut concevoir de plus faux et s'il faut le dire de plus absurde sur ce qui arrive quand on met en contact avec le [illisible] conducteur isolé ou un électromètre à pailles, peut être plus instruit sur le reste de la physique que la plupart de ceux qui le précèdent dans cette liste. Je serai d'avis d'admettre à l'école préparatoire les 18 premiers candidats puis à leur faire subir un examen oral sur toutes les parties de la physique quand ils seraient arrivés à Paris. »

Dans une lettre à un collègue non identifié, qui n'est malheureusement pas datée<sup>104</sup>, Ampère a détaillé ses vues sur l'enseignement de la physique qui :

« se compose de deux parties absolument distinctes. L'une est la physique proprement dite, elle comprend la théorie du calorique et de la vaporisation des fluides, la météorologie, l'électricité, le magnétisme et le galvanisme. L'autre est presque entièrement mathématique, on s'y occupe des lois du mouvement, du choc des corps, de la force centrifuge, de l'usage du baromètre pour

103 - Dans un brouillon de lettre daté du 27 juillet 1827 du directeur de l'instruction publique pour commander le sujet de physique, on trouve la consigne : « Les candidats n'auront eu que deux classes de physique par semaine pendant l'année qui vient de s'écouler et il convient que vous proportionniez les questions. » Hésitation visible sur le destinataire : « Dulong, professeur adjoint à la faculté des sciences de Paris » ou « Blanchet chargé de la physique à Bourbon ». Dans la marge comme une liste pense-bête : « Ampère physique / Leroy mathématiques ». AN F/17/4172.

104 - AA/20/308/7-8. On peut néanmoins déduire du contenu de la lettre qu'Ampère commente probablement le « plan d'étude des lycées » du 19 septembre 1809, dont les extraits relatifs aux sciences sont reproduits par Belhoste, *op. cit.* in n. 50, 83-86. La lettre est donc postérieure.

la mesure des montagnes et autres appareils destinés à élever les eaux. La première partie est intimement liée à la chimie et se place naturellement dans le même cours. La seconde ne peut être bien faite que par un mathématicien. »

Ce point de vue précoce d'Ampère, qui date selon toute vraisemblance de ses débuts en tant qu'inspecteur général, traduit bien le processus en cours de disciplinarisation scolaire de la physique dans les années 1810-1820. Le double caractère expérimental et mathématique de la physique y est reconnu. Mais faute d'un corps de professeurs dédiés, Ampère, qui raisonnait ici en dirigeant d'une institution, « l'instruction publique », a divisé la discipline scolaire naissante en deux cours, l'un assuré par des chimistes, l'autre par des mathématiciens.

À la toute fin des années 1820, la situation a changé.

### **Comment Péclet fait évoluer l'épreuve de physique au concours de l'École préparatoire et la discipline scolaire en général**

Péclet, entre autres, incarne ce changement. L'enseignement passe par des cours, des programmes, des manuels et des institutions – Péclet est professeur, auteur de manuels et cofondateur d'une institution presque bicentenaire aujourd'hui.

Ampère « le fit nommer, pour ses débuts dans l'enseignement, professeur de physique au lycée de Marseille, à la fin de 1815 », après l'avoir pris « en vive affection<sup>105</sup> » lors de ses études à l'École normale supérieure. Pendant que Péclet organise en août 1829 l'épreuve de physique du concours, il prépare la première rentrée scolaire de l'École centrale des arts et manufactures, qu'il fonde avec d'autres *outsider*<sup>106</sup> du milieu scientifique : le chimiste Dumas, le mathématicien Théodore Olivier (1793-1853) et l'homme d'affaires Alphonse Lavallée (1797-1873).

À Marseille, Péclet « se lia bientôt avec les chefs des maisons

105 - Charles de Comberousse, *Histoire de l'École centrale des arts et manufactures, depuis sa fondation jusqu'à ce jour* (Paris : Gauthier-Villars, 1879), 13.

106 - Pour reprendre l'expression de Bruno Belhoste, *La Formation d'une technocratie. L'École polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire* (Paris : Belin, 2003), 140.



et des usines les plus considérables et fut ainsi conduit à fonder en 1818, c'est-à-dire le premier sans doute en France, l'un de ces Cours municipaux si utiles destinés au personnel des ateliers<sup>107</sup>. C'est ainsi qu'il a « doté l'industrie d'une physique à son usage et fait profiter la science à son tour des notions qu'il recueillait dans les ateliers<sup>108</sup> ».

Pour les besoins de l'industrie naissante, l'École centrale se donne pour objectif de former des « ingénieurs civils<sup>109</sup> » par opposition au cadre régalien de l'École polytechnique. Cette formation doit introduire une véritable science industrielle, qui n'est réductible à aucune autre car « les arts industriels ne sont pas de simples applications des sciences théoriques<sup>110</sup> ». D'après Bruno Belhoste, « les premiers professeurs [de l'École centrale] eux-mêmes sont des hommes de second plan<sup>111</sup> ». Mais tous ne le resteront pas<sup>112</sup> : « En septembre 1830, lors de la deuxième rentrée, les cours de 1<sup>e</sup> année sont au nombre de quatre : géométrie descriptive (Ollivier), mécanique générale (Coriolis), physique générale (Péclet), chimie générale (Dumas). »

Péclet a un rôle fondateur dans l'enseignement de cette nouvelle « science industrielle ». Mais il est aussi chargé du cours de « physique générale » en première année. Les témoignages sont nombreux sur la qualité des cours de Péclet, y compris de celui-ci. Dumas le décrit comme un « esprit libre et ouvert ; cœur chaud, affectueux ; sachant unir dans ses leçons entraînantes les résultats de ses fortes études aux séductions de la spontanéité de son âme contribuant ainsi à donner à l'enseignement de l'École son nouveau caractère<sup>113</sup> ». Péclet est aussi l'auteur de quatre traités

107 - Comberousse, *op. cit.* in n. 105, 13.

108 - Discours de Dumas aux funérailles de Péclet le 9 décembre 1857, cité par Comberousse, *ibid.*, Appendice, p. A. 72 sq.

109 - *École centrale de arts et manufactures*, prospectus (Paris, 1829), 2.

110 - *Ibid.*, 14.

111 - Belhoste, *op. cit.* in n. 106, 140.

112 - Alexandre Moatti, « Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843) : Un mathématicien, théoricien de la mécanique appliquée », thèse de doctorat (univ. Paris-1 – Sorbonne, 2011), 145.

113 - Allocution de Dumas le 20 juin 1879 dans ministère de l'Agriculture et du Commerce, *Cinquantième anniversaire de la fondation de l'École centrale des arts et manufactures : Compte rendu de la fête des 20 et 21 juin 1879* (Paris : Gauthier-Villars, 1879), 29.

dont un de physique<sup>114</sup>, recommandé par le ministère de l'Instruction publique.

Contrairement à la vision d'Ampère des années 1810, Péclet considère que la physique forme un tout indivisible en tant que discipline scolaire :

« Si les élèves ne doivent point étudier certaines théories, ils doivent en connaître l'existence; afin qu'ils ne se fassent point illusion sur la partie de la science qu'ils ont étudiée et sur la science considérée dans tous ses développements [...] Cette disposition a l'avantage de lier entre elles toutes les parties de la physique<sup>115</sup>. »

Convaincu que « les connaissances mathématiques sont indispensables au physicien et dans les observations et dans la découverte des lois, et surtout lorsqu'on veut descendre des causes à l'explication des phénomènes<sup>116</sup> », il relie la physique mathématique à la méthode expérimentale au cœur de la pratique scolaire de la discipline : « Pour faciliter l'intelligence des faits ou des phénomènes étudiés dans les cours de physique, on fait exécuter aux élèves des expériences nombreuses. On fait monter par les élèves de grands appareils calculés par eux dans des conditions données. Ils les soumettent à divers essais pour vérifier leurs calculs<sup>117</sup>. »

Au-delà de ces quelques positionnements qui offrent un contexte, une étude plus exhaustive des vues et pratiques pédagogiques de Péclet reste à mener. Revenons ici à la spécificité de la question que Péclet pose au concours de l'École préparatoire en 1829.

En quatre ans, huit questions écrites de physique ont été posées<sup>118</sup> à ce concours. Deux d'entre elles concernent l'électricité statique et les six autres les différents domaines de la physique des gaz. Les énoncés des oraux d'admission imposés par Ampère en 1828 confirment cette répartition. Le procès-verbal laissé

114 - Eugène Péclet, *Traité élémentaire de physique*, t. 1, 3<sup>e</sup> éd. (Paris : Hachette, 1838). D'après *Bibliographie de la France* de 1825, p. 718, la première édition date de 1825.

115 - *École centrale de arts et manufactures*, prospectus (Paris, 1831), 20.

116 - Péclet, *op. cit.* in n. 114, II.

117 - Prospectus, *op. cit.* in n. 115, 21.

118 - Voir l'annexe II.

par l'abbé Pinault liste les 47 questions qu'il a posées : 7 portent sur la mécanique, 22 sur la physique des gaz, 4 sur l'optique, et 14 sur l'électricité et l'aimantation. Les proportions, comme les sujets recensés<sup>119</sup>, sont significatifs du contenu de l'enseignement de physique. Cette épreuve post-admission s'est aussi tenue en 1829, Galois est admis avec la meilleure note en mathématiques (le sujet n'est pas connu), malgré la plus mauvaise en physique<sup>120</sup>.

Cette étude quantitative confirme la place prépondérante de ces thèmes dans l'enseignement physique de l'époque : effet de la chaleur sur les gaz, les solides ou les liquides, mesures des masses et des densités de vapeur, effets et mesure des variations de pression – même si le mot n'est pas toujours employé, remplacé alternativement par tension ou force élastique.

La formulation des sujets laisse peu de place au doute : « exposez », « décrire », « indiquez », « dire comment », « développez » : il s'agit de questions de cours. Il est attendu que l'élève récite sa leçon et décrive un dispositif, une expérience ou le comportement d'un système. Les sujets confirment la place des démonstrations dans les cours de physique, que le candidat est invité à relater. Il s'agit bien de la « physique proprement dite » dans la conception d'Ampère, par opposition aux « mathématiques appliquées »<sup>121</sup>.

Seule une question fait exception : celle sur laquelle Galois a composé, posée par Pécllet en 1829 après qu'Ampère a remercié Pinault par suite de la déconvenue du sujet de 1828. Et ce caractère exceptionnel ne vient pas du champ savant qui est interrogé

119 - Exemples de sujets posés lors de cet examen du 11 novembre 1828 : « Nature de la pesanteur, sa manière d'agir sur les corps / Ce qu'est le centre de gravité d'un corps / Pesanteur spécifique... la manière de la mesurer / Constater le changement de volume d'un corps par la chaleur / Notion succincte du pendule compensateur / Notion succincte de la variation de la durée de oscillations du pendule avec sa longueur et la latitude / Principe d'Archimède / Nature de la lumière, réflexion et réfraction / Aimants / Effet du Calorique latent / Conductibilité des corps pour le calorique. » (AN F/17/4174.)

120 - Le jury de cet oral admet Galois à l'École avec cette remarque déjà citée notamment par Ehrhardt, *op. cit.* in n. 6 : « L'élève Galois est faible en physique, mais son examen de mathématiques a été bon et doit prévaloir. Il est quelquefois obscur dans l'expression de ses idées, mais il a de l'intelligence et montre un esprit de recherche très remarquable. » (AN F/17/4176.)

121 - AA/20/308/7-8.

puisque celui-ci est le plus classique à l'époque : la physique des gaz.

C'est la seule question qui introduise des variables dans l'énoncé (« la hauteur de la cloche est  $H$ , la pression est  $P$  ») et dont le correcteur attend une réponse quantitative (« on demande la valeur de la force élastique de la cloche quand on la soulève d'une quantité  $A$  »). Plusieurs candidats ont été manifestement déstabilisés par cet exercice, comme signalé plus haut : au lieu de poser des équations, ils ont récité le passage du cours qui leur semblait correspondre le mieux, voire décrit un dispositif expérimental qui aurait permis de mesurer la réponse, sans chercher à la calculer. Cette question qui mêle physique mathématique élémentaire et un dispositif expérimental est caractéristique des vues de Péclet – elle a par ailleurs un caractère d'exercice type sous une forme qui pourrait être encore posée aujourd'hui.

### **Conclusion : la valeur heuristique de l'étude de la copie de physique de Galois**

L'étude de la copie de physique de Galois permet d'entrer dans le cadre scientifique et institutionnel de l'enseignement de la physique, discipline nouvelle tout juste rendue obligatoire dans les lycées. L'éphémère concours de l'École préparatoire, à la fois artisanal dans ses méthodes mais centralisé et cohérent dans ses ambitions, nous renseigne sur les efforts de savants pour produire un cadre de formation des enseignants. Une histoire plus exhaustive de ce concours reste à écrire, sous ses aspects institutionnels et disciplinaires, étendue aussi aux épreuves de lettres.

Le potentiel heuristique de l'étude de cette copie couvre une partie de la physique comme discipline scolaire. Galois n'est pas intéressé par la physique telle qu'elle lui est enseignée. Par l'étude des programmes et des manuels, par des hypothèses sur le déroulement d'un cours, étayées sur les témoignages, sources secondaires et dispositifs expérimentaux recensés au collège royal Louis-le-Grand, par l'examen quantitatif des sujets de concours sur plusieurs années, nous avons établi qu'il subit l'enseignement d'une physique scolaire en transition, image retardée de la transition du champ savant vers la « physique mathématique

classique».

Cette transition est incarnée par les figures tutélaires d'Ampère et de Péclet, qui interviennent tous deux successivement sur l'épreuve de physique du concours de l'École préparatoire durant cette période charnière 1826-1830. Les enjeux de cette disciplinarisation scolaire se nouent dans les évolutions de la place de l'outil mathématique et de la présentation de la méthode expérimentale.

Le rôle de l'inspecteur général Ampère dans la disciplinarisation scolaire de la physique serait un objet d'étude à approfondir. Les archives numérisées sont loin d'avoir déjà toutes été exploitées. Nous n'avons mobilisé ici que celles relatives à la période et au contexte scolaire qui nous a intéressé. De manière plus globale, quelle impulsion Ampère a-t-il donné à l'enseignement de la physique ? Cette question gagnerait à être mise en lien avec les évolutions contemporaines de la physique comme science savante, dont Ampère est aussi un éminent représentant.

Les apports novateurs de Péclet pourraient aussi faire l'objet d'une future étude, en eux-mêmes. En tant que professeur de collège royal à Marseille, il a participé au large mouvement de cours ouverts, fréquentés par des artisans, ouvriers et ingénieurs durant les décennies qui ont vu le développement rapide de l'industrie sur la base de la machine à vapeur. Quelques mois plus tard, après avoir exercé quelques mois comme maître de conférences à l'École préparatoire, il a fondé l'École centrale, première filière scolaire de formation d'ingénieurs civils. Péclet, dont il n'existe pas de biographie, est actif à la croisée du développement de l'industrie, des sciences physiques et de leur enseignement pratique dans un but de développement économique.

## Annexe I : La copie de physique de Galois <sup>122</sup>

1<sup>ère</sup> question. Une cloche cylindrique pleine d'air repose sur une cuve à mercure ; le niveau du métal intérieur est situé sur le prolongement du niveau extérieur, de sorte que la force élastique de l'air de la cloche est égale à celle de l'air environnant ; la hauteur de la cloche est  $H$ , la pression est  $P$  ; on demande la valeur de la force élastique de la cloche quand on la soulève d'une quantité  $A$  <sup>123</sup>.

Soit  $h$  la hauteur <sup>primitive</sup> de la cuve à mercure,  $s$  et  $t$  les surfaces respectives des parties de la cuve sous la cloche et hors de la cloche.

Appelons  $x$  la force élastique cherchée,  $y$  et  $z$  les hauteurs sous la cloche et hors de la cloche du mercure après l'opération indiquée.

La quantité d'air comprise sous la cloche après cette opération aura pour hauteur  $A + H + h - y$ . On aura donc la proportion :

$$A + H + h - y : H :: P : x \quad (1)$$

puisque les volumes sont en raison inverse des pressions.

Ensuite, comme après l'opération, la pression supportée par le mercure sera sous la cloche,  $x$ , et hors de la cloche, toujours  $P$ , on aura <sup>124</sup>

$$y : z :: P : x \quad (2)$$

Enfin le volume de mercure devant être le même avant et après l'opération, on aura nécessairement <sup>125</sup>

$$sy + tz = h(s + t) \quad (3)$$

122 - AN F/17/4177. Mes commentaires sont en note de bas de page. Les mots barrés sont reproduits entre crochets et les ajouts en exposant. Galois a travaillé sur une feuille double à en-tête « Concours général de l'an 1829. Académie de Paris. » Les champs de date de naissance (« né le »), « département » et « collège » ne sont pas remplis mais la copie n'est pas anonyme : Galois y a simplement inscrit son nom de famille. Le correcteur a indiqué le classement de Galois (n° 7) sans autre annotation ou commentaire.

123 - Jusque-là, Galois a recopié l'énoncé, sa réponse suit.

124 - Confusion : la loi de Mariotte ne s'applique pas au mercure. Cette tentative de généralisation maladroite n'apparaît dans aucune autre copie, ni bien sûr dans aucun manuel de l'époque.

125 - Cela non plus n'apparaît dans aucune autre copie.

En éliminant de ces trois équations  $y$  et  $z$ , on aura l'équation qui détermine  $x$ . Cette équation est <sup>126</sup>

$$(A + H + h)tx^2 + [(A + H + h)s - tPH]x = P^2sH + Ph(s + t)$$

Et comme ses termes extrêmes sont de signes contraires, elle aura deux racines de signe contraire, dont la positive sera la valeur cherchée.

2<sup>d</sup> feuillet de la copie :

2<sup>e</sup> question <sup>127</sup>

La théorie des vapeurs dans le vide ne diffère de celle des gaz permanents que parce que les vapeurs peuvent à certaines pressions et à certaines températures, se liquéfier. Les seules propriétés caractéristiques des vapeurs sont [les seules] qui appartiennent au phénomène de la liquéfaction. Il y a pour chaque espèce de vapeur un degré de température au-[delà]<sup>dessous</sup> du quel elle ne peut rester à l'état de gaz. Ce changement ne s'opère cependant pas de suite.

Quand une vapeur est renfermée dans un vase, et que la capacité du vase n'est pas assez grande pour la contenir à l'état de gaz, une partie de la vapeur se liquéfie.

[Quant aux propriétés]

Fin de la copie

126 - L'expression n'est pas homogène. L'équation finale est doublement fautive : à cause de l'erreur de méthode déjà signalée à laquelle il faut ajouter une faute de calcul. En se basant sur les hypothèses de Galois, on obtient en réalité l'expression :  $(A + H + h)tx^2 + [sA + H(s - t) - ht]Px = P^2Hs$ . Dans cette expression corrigée  $x = P$  est solution lorsque  $A = 0$  (qui signifie que l'air sous cloche est à la pression atmosphérique tant qu'on ne l'a pas soulevée), garantie d'une certaine cohérence de la solution proposée.

127 - Ici Galois n'a pas recopié l'énoncé : « Développez la théorie des vapeurs dans le vide. »

## **Annexe II : Les sujets de physique au concours d'entrée de l'École préparatoire de 1826 à 1829**

Sujet de 1826 (probablement rédigé par Ampère) :

1/ Exposer la théorie du baromètre et du thermomètre; indiquer les principaux usages de ces deux instruments.

2/ Exposer la théorie de l'électricité par influence.

Sujet de 1827 (probablement rédigé par Ampère) :

1/ Décrire 1° des expériences qui prouvent la pesanteur, la compressibilité, l'élasticité de l'air, 2° l'expérience de Mariotte qui démontre qu'un volume d'air est réduit à moitié quand la pression devient double, toutes choses égales d'ailleurs, 3° l'expérience qui sert à déterminer l'augmentation qu'éprouve un volume d'air lorsqu'il élève sa température de zéro à cent degrés de thermomètre à mercure.

2/ 1° Indiquer des expériences qui prouvent la dilation des solides, des liquides et des gaz par l'action de la chaleur; 2° Donner les détails de la construction du thermomètre à mercure; 3° Faire connaître la détermination des deux termes fixes et la division de cet instrument.

Sujet de 1828 (rédigé par l'abbé Pinault) :

Première question. Sur les tensions de la vapeur d'eau

1° Dire comment on a mesuré la tension de la vapeur pour différentes températures, ce que c'est qu'un espace saturé de vapeur, quel est l'influence du changement de la température et de la pression sur un pareil espace : application de cette influence pour trouver la force élastique de la vapeur de l'atmosphère.

2° Description de l'hygromètre à cheveu et de la manière ordinaire de le graduer : cet hygromètre marque-t-il toujours le même degré pour la même tension de la vapeur; en quoi consiste l'état de plus ou moins grande humidité de l'air : les nombres marqués par l'hygromètre varient-ils proportionnellement aux variations de l'humidité de l'air, par quelle expérience peut-on le constater.



Deuxième question. Sur les influences électriques.

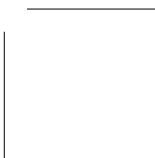
1° Qu'arrive-t-il lorsqu'un corps isolé et à l'état naturel est dans l'influence d'un corps électrisé; qu'arrive-t-il lorsqu'on vient à toucher le premier corps pendant qu'il est sous l'influence du second; expériences propres à constater ces effets.

2° Description de l'électromètre à pailles : comment faire pour le charger d'une électricité d'une certaine espèce en lui présentant à distance un corps électrisé et quand il est ainsi chargé comment sert-il à déceler la nature d'un corps électrisé quelconque.

Sujet de 1829 (rédigé par Péclet) :

1<sup>re</sup> question. Une cloche cylindrique pleine d'air repose sur une cuve à mercure; le niveau du métal intérieur est situé sur le prolongement du niveau extérieur, de sorte que la force élastique de l'air de la cloche est égale à celle de l'air environnant; la hauteur de la cloche est  $H$ , la pression est  $P$ ; on demande la valeur de la force élastique de la cloche quand on la soulève d'une quantité  $A$ .

2<sup>e</sup> question. Développez la théorie des vapeurs dans le vide.



## SOURCES ET RECHERCHE

### L'histoire des sciences et l'approche biographique : Le cas de Louis Pasteur

Entretien avec Michel Morange \*

*Michel Morange est l'auteur d'une biographie de Louis Pasteur parue en 2022 à l'occasion du bicentenaire de la naissance de celui-ci<sup>1</sup>. Il partage ici des éléments de réflexion, tirés de sa propre expérience, sur la pratique de la biographie en histoire des sciences<sup>2</sup>.*

**La biographie n'est pas un genre très répandu en histoire des sciences, quelles en sont à votre avis les raisons ?**

Je pense que la raison principale est que la biographie a souvent été à l'origine de mythes. Elle était écrite pour vanter un personnage, montrer les actions héroïques d'un guerrier, le génie d'un scientifique. Les biographies contiennent beaucoup de récits faussés ou même faux pour valoriser l'œuvre de la personnalité concernée. Un autre aspect est sans doute aussi que les scientifiques considèrent la science comme une activité collective et donc écrire une biographie serait laisser penser qu'un ou quelques scientifiques ont été à l'origine de toutes les découvertes et que l'on ignore ainsi tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la découverte. Ce sont je pense les deux grandes raisons qui ont fait que les biographies continuent à ne pas être bien considérées par les historiens des sciences. Les mêmes critiques ont été faites par les historiens en général, mais ce tabou a aujourd'hui disparu. En effet, de nombreux historiens n'hésitent pas à écrire des biographies, on peut d'ailleurs citer l'ouvrage de

\* Michel Morange, Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques, 13 rue du Four, 75006 Paris.

1 - Michel Morange, *Pasteur* (Paris : Gallimard, 2022).

2 - Propos recueilli par Stéphane Tirard le 16 mars 2024.

Vincent Duclert, *L'Avenir de l'histoire*<sup>3</sup>, dans lequel il affirme que la biographie est un genre excellent pour appréhender un certain nombre de questions. On a pensé que c'était le genre biographique qui était le problème, en fait le problème c'est ceux qui ont rédigé les biographies et aussi le public qui attend souvent de belles histoires valorisant un personnage.

**Pourquoi avoir fait ce choix d'écrire une biographie de Pasteur ?**

Parce qu'il a été à l'origine de l'un des mythes les plus puissants de l'histoire des sciences, parce qu'aussi il y a eu trois types de travaux s'intéressant à Pasteur dont je souhaitais me distinguer. La première catégorie est celle des ouvrages confortant le mythe et présentant une histoire merveilleuse. La deuxième concerne des ouvrages qui ne sont pas exactement des biographies, car ils se concentrent sur un épisode scientifique particulier, mais qui montrent que Pasteur n'a pas fait ce qu'il dit avoir fait ou que d'autres ont dit qu'il avait fait. Ces travaux sont très utiles car ils révèlent un certain nombre d'erreurs dans le mythe, mais il se limitent à cette indication. Prenons l'exemple de l'expérience qui a été à l'origine de la vaccination, l'expérience sur le choléra des poules. Le récit que l'on trouve dans les premiers ouvrages écrits sur Pasteur est que l'on faisait dans son laboratoire des cultures du bacille responsable de cette maladie et qu'on l'injectait à des volatiles pour étudier son effet. Au début des vacances, Charles Chamberland, l'assistant de Pasteur, aurait laissé des cultures sur la paille, à son retour il les aurait reprises et les aurait injectées à des poules qui n'auraient pas contracté la maladie. Ensuite, il aurait injecté des bactéries d'une culture fraîche à ces mêmes poules et à nouveau les poules n'auraient pas développé la maladie. Il en aurait parlé à Pasteur qui, après un très court temps de réflexion, lui aurait dit que les premières bactéries, vivantes, mais qui n'étaient plus capables d'engendrer la maladie, étaient atténuées et auraient été une protection contre les bactéries mortelles. C'est donc le principe de la vaccination. Ainsi, l'expérience était ratée, mais grâce au génie de Pasteur elle aurait conduit au procédé de fabrication des vaccins. L'historien

3 - Vincent Duclert, *L'Avenir de l'histoire* (Paris : Armand Colin, 2010).

italien Antonio Cadeddu<sup>4</sup> a montré en étudiant les cahiers de laboratoire que cette expérience n'avait jamais été faite sous cette forme, en particulier il n'y avait jamais eu cette succession d'injections d'une bactérie atténuée suivie de l'injection d'une bactérie virulente. Ce qu'il a montré par contre c'est qu'à cette époque dans le laboratoire de Pasteur on utilisait des méthodes pour atténuer des bactéries. Ce qui conduit inéluctablement à la conclusion qu'en fait il y avait déjà un programme de recherche dans le laboratoire de Pasteur sur l'atténuation des micro-organismes pour en faire des vaccins. Curieusement Cadeddu n'en dit pas un mot. D'où venait cette idée ? Comment Pasteur avait-il acquis cette conviction ? On aimerait que l'historien aille un petit peu plus loin et cherche une nouvelle interprétation du déroulement des événements. On peut faire des hypothèses et essayer de trouver les voies par lesquelles Pasteur serait arrivé à cette conclusion. Il est très difficile d'affirmer que telle ou telle voie a été essentielle, mais il existe des indices. Notamment, l'exemple déjà connu de la protection contre la variole grâce à la vaccine de vache que l'on considérait comme une forme atténuée de la maladie. Par ailleurs, Pasteur a travaillé pendant des décennies sur les cultures bactériennes. Il a observé qu'elles changeaient et que ces changements pouvaient être transmis à la descendance. On savait également depuis peu, notamment grâce aux expériences initiées par Robert Koch, que lorsque l'on passait les germes d'une espèce animale à une autre, ils pouvaient devenir plus virulents. Je pense qu'il était assez facile de se demander si la virulence ne pourrait pas aller dans l'autre sens et décroître. Il y avait des médecins qui commençaient à réfléchir dans ce sens, notamment Joseph-Alexandre Auzias-Turenne. Il avait essayé d'obtenir un germe atténué de la syphilis, mais ses expériences avaient été très critiquées, elles marchaient très mal et on ne peut pas dire qu'il ait convaincu la communauté scientifique. Il y avait donc un fonds d'idées et c'est là une difficulté majeure pour l'historien. Bien sûr, il y a les carnets de notes, les cahiers de laboratoire, mais il y a aussi tout ce qu'un scientifique entend et lit, sans prendre de notes, mais l'idée est là et ça c'est très difficile à montrer. On ne peut que proposer des interprétations et essayer de les conforter.

4 - Antonio Cadeddu, Pasteur et le choléra des poules : Révision critique d'un récit historique, *History and philosophy of the life sciences*, 7/1 (1985), 87-104.

La troisième catégorie d'ouvrages reprend le mythe, mais en l'atténuant. Ils insistent par exemple sur les emprunts de Pasteur à tel ou tel autre scientifique ou soulignent qu'il n'était pas parfait, tout cela sans faire une recherche historique originale. Ce sont des récits à peine améliorés qui n'apportent rien à l'histoire. Beaucoup d'ouvrages de ces dernières décennies souffrent de cette tendance.

### **Pourquoi la biographie est-elle un genre intéressant ?**

La première raison est qu'elle est un bon moyen de décrire le milieu dans lequel les travaux des scientifiques se déploient. Car la biographie décrit l'environnement et les personnages rencontrés, c'est un moyen exceptionnel pour avoir une idée du milieu. Par exemple, on peut observer comment Pasteur se déplace lors de ses voyages et mesurer les conséquences des transformations des transports au XIX<sup>e</sup> siècle. Lorsqu'il vient à Paris pour la première fois, il lui faut trois jours et deux nuits en diligence pour venir de Dole. Ensuite, le train se développe en Europe et il l'utilisera lorsqu'il fera une tournée dans les grandes villes d'Allemagne en 1852. Lorsqu'il a réalisé la vaccination contre la rage, cet événement a eu une grande répercussion, notamment parce que le télégraphe était devenu d'usage absolument courant et aussi parce que les transports étaient devenus beaucoup plus rapides. Ce qui permit à de jeunes habitants de Newark aux États-Unis, mordus par des chiens enragés, de venir se faire soigner par Pasteur grâce aux bateaux à vapeur rapides qui assuraient les liaisons transatlantiques. Les Russes de Smolensk, à plus de 2 000 km de Paris, sont venus quant à eux parce qu'il y avait le train. Le premier intérêt de la biographie est donc cette mise en contexte.

Le deuxième intérêt de la biographie est de révéler des curiosités comme des changements de sujets ou l'adoption d'une nouvelle théorie... La biographie permet de révéler des traces des transformations qui ont accompagné ces changements. C'est une bonne base pour essayer de réinterpréter certaines orientations nouvelles dans la recherche.

Troisième raison, la biographique révèle les connexions d'un savant avec le milieu scientifique. La sociologie des sciences parle beaucoup des réseaux, mais un savant comme Pasteur était un

nœud important du réseau. Il l'était dans certains cas à cause de son propre travail, dans d'autres cas parce qu'il était d'une personnalité telle qu'il centralisait les informations et il pouvait justement les orienter. Peu importe au fond le sens qu'on donne au mot réseau, un réseau n'est pas forcément le point de création, mais c'est aussi un point de passage. La biographie permet d'appréhender ce réseau, et quelques fois, il faut aller le chercher non pas dans le petit cercle scientifique, mais au-delà, la correspondance étant alors une source extraordinaire pour l'appréhender.

Un dernier élément sur la biographie est qu'il faut qu'elle soit critique, c'est-à-dire quelle tente de raconter la vérité, ce qui s'est réellement passé. Mais, sans être trop systématiquement critique à l'égard du personnage, il faut savoir faire preuve d'empathie, c'est ce que Guy Bruit, le directeur de *Raison présente*, a noté à l'égard de ma biographie de Pasteur. L'empathie, cela ne veut pas dire que l'on excuse le personnage ou que l'on ne fait que vanter ses mérites, cela veut simplement dire que l'on décrit le personnage tel qu'il est, qu'on ne jette pas l'opprobre sur lui. L'empathie est la juste distance.

### **Pourquoi le choix de Pasteur ?**

J'estimais qu'il n'y avait pas de biographie satisfaisante. Je vais donner des exemples de réinterprétations que l'on peut faire sur certains épisodes de la vie de Pasteur et cela en combinant la biographie au sens large, la vie personnelle, avec ce que l'on sait de la science que faisait Pasteur.

Premier exemple, celui des premières années de Pasteur et de sa première grande découverte sur le tartrate. Il s'agit en fait de deux molécules chimiques, le tartrate et le paratartrate, et Pasteur a d'abord confirmé en utilisant une technique de déviation de la lumière polarisée que le tartrate naturel déviait la lumière polarisée alors que le paratartrate, trouvé en petite quantité dans les fabriques de tartrate, ne déviait pas la lumière polarisée. Il révèle que le paratartrate est la combinaison de deux molécules différentes : le tartrate que l'on connaissait déjà et un autre tartrate qui dévie la lumière polarisée dans un autre sens d'où évidemment une somme nulle. Il le découvre et montre en même temps que les cristaux de ces deux formes de tartrates sont presque

identiques, mais qu'ils sont les images l'un de l'autre dans un miroir. Cette découverte a eu un grand impact et attiré l'attention sur Pasteur parce qu'au-delà de sa découverte de ces deux tartrates, il fait également l'hypothèse que leurs molécules respectives sont elles-mêmes l'image l'une de l'autre dans un miroir, sans évidemment aucune preuve directe. Cette hypothèse a été ultérieurement confirmée et elle est à la base de la stéréochimie. La deuxième étape de la vie de chercheur de Pasteur ce sont ses travaux sur la fermentation. C'est à Lille cette fois, les travaux précédents ayant été réalisés à Paris, puis à Strasbourg. Il montre assez rapidement que les fermentations sont dues à la présence de micro-organismes. On avait déjà vu des micro-organismes, mais on ne connaissait pas leur rôle et Pasteur va donc montrer qu'ils sont responsables de la fermentation et que chaque fermentation est liée à un micro-organisme différent.

Ce sont là les deux plus grandes découvertes de Pasteur sur un plan fondamental. Le récit actuellement répandu, que Pasteur lui-même a d'ailleurs justifié, prétend que lorsqu'il a commencé à travailler sur la fermentation il savait déjà que lors de ce phénomène apparaissent des substances qui dévient la lumière polarisée et qu'elles ne peuvent pas venir simplement de la transformation du sucre. Il en aurait déduit que s'il y a de telles substances c'est probablement qu'il y a de la vie. Il aurait donc recherché la présence de celle-ci dans les fermentations et trouvé ces fameux micro-organismes, les aurait analysés et il serait arrivé aux conclusions que j'indiquais précédemment. De là, le récit dit que c'est l'intérêt pour la vie qui a guidé le travail de Pasteur depuis le début puisqu'il savait que les substances comme le tartrate ou autre, qui dévient la lumière polarisée, venaient du monde vivant. Dès le début, il y aurait eu un lien avec le monde vivant, lien qu'il aurait prolongé et qui l'aurait conduit à ses travaux sur les fermentations. C'est donc cette continuité qu'on lie à ce qu'on a appelé le vitalisme de Pasteur. C'est à dire que Pasteur met la vie au cœur de phénomènes importants tels que les fermentations et plus tard au cœur des maladies infectieuses. Donc la vie serait son fil rouge et elle ne peut être réduite à la chimie. Lorsque certains chimistes veulent réaliser la fermentation *in vitro*, Pasteur affirme que pour une fermentation il faut qu'il y ait un être vivant.



Il y a dans cette histoire de nombreux aspects pas très clairs. Premier aspect que j'ai toujours trouvé obscur, c'est cet intérêt de Pasteur pour savoir d'où venait le paratartrate. En effet, il a fait un grand voyage en Europe à la recherche de paratartrate qui avait disparu dans les fabriques de tartrate en France. Pourquoi retrouver du paratartrate ? Pour connaître son origine ? Ce n'est pas une réponse suffisante. Deuxième aspect qui n'est pas très clair, l'origine de cette déviation de la lumière polarisée, le fait qu'une molécule puisse ne pas être identique à son image dans un miroir, sera expliqué par la présence d'un carbone asymétrique vingt ans après la découverte de Pasteur. Il n'accorde alors aucune attention à ce résultat ! Alors que ceux qui travaillaient sur le carbone asymétrique disaient que c'est son travail qui était à l'origine de leur recherche. Ce désintérêt est très curieux. En fait, cette découverte ne lui plaisait pas ! Le troisième aspect repose sur le travail que vous avons réalisé avec Cristiana Oghina-Pavie sur les cahiers de laboratoire pour la période de Lille. Lorsque Pasteur commence à travailler sur les fermentations, quel type d'expérience fait-il ? La plus grosse surprise, et je me limiterai à ça, est qu'on ne trouve aucune expérience pour mesurer la déviation de la lumière polarisée, aucune. On trouve par contre beaucoup d'observations sur les micro-organismes qui vont petit à petit devenir plus précises, plus claires. Donc notre conclusion a été que, en fait, il n'y avait pas eu de continuité dans l'œuvre de Pasteur. Il y a eu son travail sur le tartrate et ensuite un travail sur les fermentations, sans une continuité qui serait liée à un intérêt pour la vie. Qu'est-ce qui permet de penser ça ? Ce sont des éléments supplémentaires.

Premièrement, lorsqu'on étudie les travaux qu'il a effectué entre sa découverte des tartrates et son départ à Lille, on constate qu'il mène une recherche visant à trouver un intermédiaire entre les molécules natives et les molécules ayant leurs formes asymétriques et Pasteur imagine cet intermédiaire comme ayant une forme plate. Il n'est pas très clair, mais les molécules chimiques existaient d'abord sous une forme neutre et c'est ensuite qu'elles acquièrent leurs formes gauche et droite. Un certain nombre d'expériences mal interprétées semblaient suggérer cela. Mais cette hypothèse était totalement fausse et Pasteur s'en est rendu compte au bout de quelques temps. Son projet était donc dans une impasse. Il ne l'a pas reconnu et a pré-

féré dire qu'il y avait une continuité. Autre élément, emprunté cette fois à la vie, en 1854, juste avant de partir à Lille, Pasteur prend un congé de maladie soi-disant pour un problème cardiaque. C'est assez curieux parce que jamais aucun médecin n'a confirmé qu'il ait eu ce type de maux. Plus étonnant encore, alors qu'il consacrait tout son temps au laboratoire, il vient à Paris et passe ses journées à se promener au jardin du Luxembourg avec sa femme et ses enfants. C'est totalement surprenant ! Pourquoi fait-il cela ? Mon interprétation assez simple c'est que Pasteur ne sait plus très bien comment sortir de cette impasse. Et il aura la chance que l'on crée un poste à Lille, il postule et est nommé, c'était une manière de démarrer un nouveau projet dans un nouvel environnement, de rompre avec le passé. Enfin dernier problème : pourquoi lui-même a-t-il défendu la légende ? Car il l'a lui-même défendu. Parce que lorsqu'un savant annonce qu'il fait une découverte qui aura des suites importantes et qu'il change tout à coup de sujet, cela jette un doute sur le fait que la première découverte était si riche potentiellement. Deuxième problème, en changeant de sujet il change aussi d'interlocuteurs et on quitte la micro-communauté scientifique qui connaît son travail. Cela donne une œuvre hétérogène et tout le monde sait que ce n'est pas apprécié par les commissions qui jugent sur une thématique, une approche. Je pense que Pasteur l'a très bien compris et au fond le lien qu'il a établi est purement stratégique.

Pour revenir au vitalisme, il faut souligner que Pasteur n'était pas vitaliste ; il était simplement un biologiste. C'est très clair dans le cas de la fermentation. Il dit qu'il n'y a pas de fermentation sans la présence de micro-organismes, car c'est l'utilisation par eux du liquide nutritif qui provoque le phénomène de fermentation. Un chimiste aurait dit qu'il y a fermentation parce qu'un certain nombre de réactions se produisent et qu'on peut tenter de les décrire. Or Pasteur a là une explication biologique. Il n'exclut pas l'explication chimique, mais ajoute simplement quelque chose à l'explication qui est fournie.

Je peux développer un second exemple autour d'un autre mythe pasteurien, celui selon lequel Pasteur avait en tête dès le départ de lutter contre les maladies. À nouveau on trouve quelques écrits de Pasteur disant que ces travaux auront sûrement une importance pour comprendre les maladies. Cependant, il n'était

pas le premier à le dire. Cela remonte en effet à plus de deux siècles, le grand chimiste britannique Robert Boyle avait dit que celui qui comprendrait les fermentations, comprendrait les maladies. Et puis, c'était une idée commune à l'époque. D'ailleurs lorsqu'on raconte la vie de Pasteur, on dit que lors de sa première rencontre avec l'empereur Napoléon III, celui-ci lui a parlé des maladies qu'il avait observé lors des campagnes d'Italie et il lui a demandé ce qu'il en pensait et si des micro-organismes n'en étaient pas responsables. Pasteur n'allait pas décevoir l'empereur, il a approuvé et annoncé que ce serait l'un de ses objectifs importants. Ce ne sera pas la réalité, Pasteur ne se tournera pas vers l'étude des maladies infectieuses avant 1876. Il y a bien l'épisode des vers à soie, mais ce n'est qu'un épisode en 1865-1870 et il a alors du mal à accepter l'idée que ce sont des micro-organismes qui sont responsables de ce qu'il observe, plus de mal que ses collaborateurs, c'est assez étonnant.

On pourrait ajouter là aussi des anecdotes que l'on trouve par exemple dans la correspondance quand il dit dans les années 1850 que la gangrène, qui était pourtant l'une des maladies qui évoquait le plus le lien avec les fermentations, à cause de la putréfaction et de l'odeur de pourriture, n'était pas due à l'action d'un micro-organisme. Également, lorsque sa fille Cécile meurt en 1866 de fièvre typhoïde, il expliquera dans les années qui suivent que la maladie avait probablement été provoquée par le fait que très jeune elle avait été spectatrice d'un incendie qui s'était produit pas très loin de leur domicile et que cela l'avait traumatisé. Enfin, lors d'une épidémie de choléra à Paris, Pasteur écrit à l'un de ses correspondants qu'il se médique pour se protéger contre la maladie. Il s'agit d'une prise de remèdes qui n'a rien à voir avec l'explication microbienne. Deux choses vont le décider à se tourner vers l'explication microbienne.

D'abord Joseph Lister, le savant anglais, qui prenant appui sur les travaux de Pasteur sur les fermentations avait créé un pansement antiseptique à base de phénols; il avait commencé à montrer son rôle positif en chirurgie. Son utilisation réduisait en effet considérablement la mortalité après les opérations. En 1874, Lister écrit à Pasteur qu'il a été à l'origine de ses travaux. Pasteur le remercie et lui demande de les lui envoyer car il ne les a pas lus. Il n'y avait pas prêté attention, alors qu'ils avaient été publiés

dans de grandes revues. Puisqu'on lui dit qu'il a été à l'origine de ces travaux, il envisage donc de poursuivre dans cette voie. Enfin, mais c'est là sa vie privée, après son attaque d'apoplexie de 1868 qui l'a laissé paralysé du bras gauche et avec quelques problèmes d'élocution, Pasteur a eu le sentiment que sa vie active était terminée. Il le dit dans de nombreuses lettres. Il pense qu'il ne peut plus que donner des conseils à de jeunes chercheurs et, il l'avoue, il souhaite tirer les bénéfices du travail accompli. Je pense que Pasteur se voyait « fini » au début des années 1870.

Le deuxième événement, c'est l'expérience de Koch de 1876 sur le charbon dans laquelle, premièrement, il isole le microbe du charbon, qu'il n'est cependant pas le premier à observer, le cultive dans des yeux de bœuf, donc une sorte de milieu artificiel où il poussait très bien, puis il va le passer d'œil de bœuf en œil de bœuf, donc faire une culture en série, puis l'injecter à plusieurs espèces animales et montrer que ce microbe provoque chez ces animaux des symptômes qui rappellent ceux du charbon chez les grands animaux et chez l'homme. C'est un article que Pasteur a très rapidement connu grâce à ses collègues britanniques. Lorsque l'on regarde la chronologie, c'est très clair. Quelques mois après, Pasteur écrit au ministre de l'Instruction publique pour lui annoncer qu'il compte reconvertir entièrement son laboratoire vers l'étude des maladies infectieuses animales et humaines. Il publie un premier article sur le charbon. Sa stratégie ne consiste pas à nier que Koch ait écrit un article important, cela aurait été difficile, le travail de son collègue avait eu un impact, mais à attribuer à Koch le mérite d'une observation secondaire qui est la formation des spores. Il montrait en effet comment des spores se formaient, ce qui était d'ailleurs l'explication de la persistance de la maladie. C'était quelque chose d'important. Mais Pasteur dit qu'il avait déjà observé des spores dans les maladies des vers à soie, en oubliant de dire qu'il n'en avait pas vu l'intérêt pour la maladie. Enfin, il ne parle pas des autres résultats de Koch, et dans son premier article il relate une expérience identique à celle de Koch. Il prend un animal infecté, cultive la bactérie dans des ballons, c'était sa technique, la passe de ballon en ballon, puis la réinjecte à l'animal et montre qu'il développe le charbon. Il affirme que l'expérience de Koch n'avait pas convaincu, mais que la sienne est bien mieux faite et que c'est son travail qui est convainquant. Il sera totalement injuste avec

Koch, très rapidement il ne citera plus son article, et dans son autobiographie sur des découvertes sur les maladies il ne parlera que de ses propres travaux. En liant des éléments personnels aux éléments scientifiques, on arrive à une autre conclusion : que Koch a eu un rôle absolument essentiel, que Pasteur en a eu parfaitement conscience et qu'il a tout fait pour attirer l'attention sur un autre aspect du travail de Koch et pour dévier l'attention de l'apport principal de son concurrent.

### **Quelles ont été les difficultés méthodologiques ?**

Il y en a une qui a déjà été évoquée : nous n'avons malheureusement pas accès à la communication informelle. Il est difficile de percer ce mur et il ne faut pas se fier à ceux qui l'auraient soi-disant percé. Par exemple, revenons sur la question : pourquoi Pasteur aurait eu l'idée d'atténuer ? Le neveu de Pasteur, Adrien Loir, a affirmé que c'était lui qui était à l'origine du lien entre le médecin Auzias-Turenne, auteur d'un ouvrage sur la « syphilisation », et Pasteur. Il lui aurait offert son livre et Pasteur l'aurait mis sur sa table de chevet et c'est cela qui l'aurait influencé et l'aurait conduit au principe de l'atténuation. Le problème est que puisque Loir était assez critique à l'égard de son oncle, le titre de son livre *À l'ombre de Monsieur Pasteur* est significatif à cet égard, tous les critiques des sciences ont pensé qu'il disait la vérité. Il y a d'autres choses totalement fausses dans l'ouvrage de Loir. Il insiste par exemple sur le fait que les techniques dans le laboratoire de Pasteur n'étaient pas les meilleures, qu'elles étaient anciennes, avec de vieux instruments. Il est vrai que Pasteur étant âgé, il était attaché à certaines approches, les ballons pour la culture, etc. Il n'empêche que, peu avant, le laboratoire de Pasteur avait utilisé des techniques très modernes, par exemple la microphotographie pour caractériser les microbes responsables de la maladie du vers à soie, avec un spécialiste de la photographie, et c'était tout à fait moderne pour l'époque, très peu de laboratoires le faisaient. Si Pasteur pouvait parfois être réticent, Émile Roux était pour sa part ouvert aux techniques et il connaissait bien ce que faisait les Allemands. Il n'y avait pas de retard technologique du laboratoire de Pasteur.

Autre difficulté, il n'est pas toujours facile de savoir ce que Pasteur a vraiment vu. A-t-il bien interprété ce qu'il voyait ? Il y a une dispute au sujet d'une autre maladie qu'il a étudié, le rou-

get du porc. Il aurait produit un vaccin, mais Theobald Smith, un microbiologiste américain, a affirmé qu'il avait reçu une culture provenant du laboratoire du Pasteur et que ce n'était pas le véritable agent du rouget. A-t-il tort ? A-t-il raison ? S'agit-il de deux maladies ? Il est très difficile de le savoir. Pour ma part, j'ai considéré que ce n'était pas fondamental, j'ai dit ce que Pasteur a dit qu'il avait fait et je parle de la contestation de ses collègues. Finalement, qu'il se soit trompé ou pas, cela ne veut pas dire qu'il était un mauvais microbiologiste. Tous les microbiologistes à l'époque se trompaient. Les outils d'observation étaient limités, on pouvait faire des erreurs.

Mais la difficulté majeure est double. Il s'agit de l'abondance des documents, il y a eu tant de choses écrites sur Pasteur. Il faut tout lire, mais cette lecture n'est pas enthousiasmante car tout le monde s'est copié et on relit toujours les mêmes histoires, les vraies autant que les fausses. Il est difficile de se sortir de cette accumulation. L'autre limite est qu'il peut manquer des documents, bien que Pasteur ne soit pas le pire des cas, puisque l'on a beaucoup de sources entre ses cahiers de laboratoire, ses écrits scientifiques, ses conférences qui ont été très tôt publiées et une grande partie de sa correspondance.

**Est-ce que toutes les personnalités peuvent se prêter à cette approche biographique ? Si ce n'est pas le cas pourquoi ? Quels autres scientifiques pourraient en être l'objet ?**

Ce qui est limitant c'est la documentation. Pour une biographie assez complète, il faut disposer des écrits scientifiques, on peut y parvenir, et encore imparfaitement, mais il faut aussi avoir accès à la correspondance professionnelle, mais aussi éventuellement privée car elle est intéressante. Elle n'a pas toujours été conservée ou très souvent de manière très incomplète. C'est une sérieuse limite. Deuxième chose, il faut que la personne nous intéresse particulièrement. Pour Pasteur, cela était justifié par l'anniversaire de sa naissance, et la crise de la Covid-19 a également redonné une importance centrale à son œuvre : que l'on soit favorable au vaccin – c'était le père du vaccin – ou que l'on soit opposé – c'était le grand empoisonneur. De toute façon, Pasteur, plus ou moins déformé ou pas, était au cœur des débats.

### *L'histoire des sciences et l'approche biographique*

Parmi les personnalités qui pourraient faire l'objet d'une biographie, il y a Robert Koch. Il existe bien des biographies, mais plutôt scientifiques, et il manque à ma connaissance une biographie complète et profitant de la recherche historique. Je ne le ferai pas parce que je ne lis pas l'allemand, que l'on doit lire comme sa langue maternelle et en connaissant la langue de l'époque notamment pour étudier en profondeur la correspondance. Ce serait intéressant, car pour lui aussi il y a eu un mythe lorsque par malchance le régime nazi en a fait une de ses idoles. D'autres personnalités pourraient faire l'objet de biographies, comme Laennec, car il existe une documentation importante, la traduction augmentée d'un ouvrage américain est d'ailleurs en préparation<sup>5</sup>. On peut penser aussi à François Jacob, mais il y aurait des lacunes de documents, ses archives personnelles sont dispersées. Les biographies seront donc limitées à quelques personnalités, mais cela n'enlève rien à leur intérêt.

5 - Jacalyn Duffin, *To see with a better eye : A life of R. T. H. Laennec* (Princeton University Press, 1998).





## ANALYSES D'OUVRAGES

### Liste des analyses d'ouvrages publiées dans ce numéro

Jean-Pascal ANFRAY (éd.), *Correspondance René Descartes – Henry More : 1648-1655* (Paris : Éliott, 2023), par François Duchesneau

Sandra BELLA, *La (Re)construction française de l'analyse infinitésimale de Leibniz* (Paris : Classiques Garnier, 2022), par Alain Bernard

Jenny BOUCARD, Christophe ECKES (dir.), *Arranger, disposer, combiner : Théories de l'ordre dans les sciences, les arts d'ornement et la philosophie* (Paris : Hermann, 2023), par Olivier Perru

Faisal KENANAH, *Les Animaux chez Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī : Classement et influences des transmissions (Aristote – Ibn al-Bīṭrīq – Ġāḥiẓ)* (Bruxelles : Éditions Safran, 2023), par Meyssa Ben Saad

Gregory RADICK, *Disputed inheritance : The battle over Mendel and the future of biology* (Chicago / Londres : The University of Chicago Press, 2023), par Laurent Loison

Sébastien RICHARD, *Histoire philosophique de la physique* (Paris : Vrin, 2022), par Charly Mobergs

Sabine ROMMEVAUX-TANI (éd.), *De sex inconvenientibus : Traité anonyme de philosophie naturelle du XIV<sup>e</sup> siècle* (Paris : Vrin, 2022), par Daniel A. Di Liscia

Jean-Pascal ANFRAY (éd.), *Correspondance René Descartes – Henry More : 1648-1655*, éd. bilingue latin-français, précédée d'une présentation par J.-P. Anfray, « Étendue, corps et esprit : Le dualisme en questions » (Paris : Éliott, 2023), 15 × 22 cm, 422 p., bibliogr., index nominum, coll. « Réflexion faite ».

Si cette correspondance des deux philosophes est remarquable à maints égards, il nous tardait de la voir reconstituée en sa continuité et traduite dans tous ses éléments, y compris les échanges avec Clerselier, celui-ci ayant porté à la connaissance de Henry More le brouillon de l'ultime réponse de Descartes et recueilli la dernière lettre que le philosophe de Cambridge destinait à Descartes et dont la mort du destinataire avait suspendu l'envoi. Certes, ces documents ont été précédemment édités et traduits, mais il nous importait de pouvoir les lire dans une édition qui leur fût réservée, accompagnée d'une traduction fidèle et reflétant l'état des connaissances sur les tenants et aboutissants des arguments évoqués de part et d'autre. Outre les annotations qui éclairent l'interprétation des textes, Jean-Pascal Anfray a édité et traduit en appendice des textes de More qui illustraient sa compréhension de la doctrine cartésienne et ses réserves à l'égard des principes de philosophie naturelle en découlant : il s'agit d'éléments de correspondance entre More et Samuel Hartlib, d'une lettre de More à Anne Conway du 5 mai 1651 et de la célèbre lettre à V.C. qui contient l'apologie de Descartes et une introduction à l'ensemble de sa philosophie, lettre que More republiera à diverses reprises en appui à ses propres œuvres.

L'écrit de commentaire de quelque 200 pages qui précède les textes édités et traduits est issu de l'inédit présenté par Anfray pour l'habilitation à diriger des recherches. Il représente une analyse fouillée des thèmes de la correspondance échangée entre un Descartes contraint de préciser sa pensée sur des points délicats de philosophie naturelle et un jeune Henry More, admiratif de l'œuvre cartésienne, mais soucieux d'y déceler des apories qui feraient obstacle à une métaphysique soutenant que des principes d'ordre spirituel animent la matière. Il faut ici comprendre que More est adepte de la nouvelle science de la nature dont Descartes jette les fondements, mais qu'il ne saurait se satisfaire de l'ontologie sévère et parcimonieuse qu'exposent les *Principia philosophiæ* et dont il soupçonne les insuffisances, malgré l'excellence des modèles explicatifs produits. Il convient donc d'y opposer des thèses relevant de la tradition néoplatonicienne, ou du moins d'en suggérer la prise en compte pour un ajustement nécessaire de la métaphysique cartésienne.

Cinq thèmes fixent l'ordonnance du commentaire. Le premier, « corps, étendue et impénétrabilité », évoque les arguments divergents des deux auteurs sur le fondement de l'impénétrabilité des corps attribuée à la seule propriété essentielle d'étendue, selon Descartes. Se trouvent alors soulevées la question d'une hétérogénéité concevable de l'espace comme étendue pénétrable et celle du rapport de l'impénétrabilité même à la divisibilité des corps. Sur ces points, Anfray analyse les divers arguments cartésiens et les compare aux références scolastiques qui permettent d'en éclaircir la spécificité. Le second thème « Dieu, l'âme et le lieu » est traité à la lumière de la distinction

proposée par More dans l'*Enchiridion metaphysicum* (1671), entre « hollenmérisme » et « nullibisme », le premier supposant la localisation des esprits tout entiers dans le tout de l'espace et dans chacune de ses parties, le second présumant la non-présence et par suite la non-existence des esprits en quelque part que ce soit de la nature. Si Descartes admet une étendue de puissance et non de substance en Dieu, More ne saurait accepter une telle restriction et Descartes semble se rallier à ce point de vue dans le brouillon de son ultime réponse. Or Anfray poursuit l'analyse des arguments en rappelant la distinction scolastique entre « lieu circonscriptif » et « lieu définitif », le premier renvoyant au fait d'exister quelque part en général, le second désignant la surface de contact enveloppant un corps donné : il examine l'application qui peut être faite de ces modes de localisation à Dieu, aux créatures immatérielles et à l'âme humaine dans son rapport à son corps. Il identifie la position de More à l'époque de la correspondance à un hollenmérisme idiosyncrasique applicable à toutes les substances immatérielles. Il identifie par comparaison la position de Descartes à un hollenmérisme restreint « selon lequel l'âme possède une localisation hollenmérique dans la glande pinéale » (97), mais, dans le même temps, la présence de l'âme au corps tout entier « comporte un aspect irréductible à l'interaction causale ainsi qu'à la localisation qui la sous-tend. Or cet aspect coïncide précisément avec cette expérience d'une coextension de l'âme et du corps, c'est-à-dire avec le hollenmérisme phénoménologique » (*ibid.*). C'est là une interprétation intéressante qui subordonne la modélisation physiologique de l'interaction causale à l'expérience « métaphysique » de l'union de l'âme et du corps, expérience qui implique leur localisation conjointe. Troisième thème : « le vide, les atomes et le monde indéfini : le rôle de la toute-puissance divine ». À ce sujet Anfray explore les arguments cartésiens classiques qui excluent la possibilité du vide et des atomes. Il montre avec justesse les raisons incitant Descartes à récuser la conception d'un monde positivement infini qui contreviendrait à la seule attribution possible de cette magnitude à Dieu selon ce que nos entendements finis peuvent en comprendre. Usant d'un vocable réutilisé par Leibniz, Anfray fait donc valoir le caractère « syncatégorématique » de l'indéfini cartésien appliqué aux entités constitutives du monde, et il montre comment la doctrine de la création des vérités éternelles confirme l'intelligibilité nécessaire pour nous du concept d'un tel infini. À l'atomisme qu'endosse More, c'est-à-dire à la division actuelle réalisée des parties de la matière, présumée requise pour fonder la substantialité des corps, la réplique cartésienne oppose les exigences d'une perspective épistémologique relative aux conditions d'intelligibilité de l'ordre physique. Le traitement du quatrième thème : « mouvement, repos et forces » est d'un grand intérêt, car il cible l'incapacité apparente de la physique cartésienne à rendre compte des principes positif et négatif d'action suscitant le mouvement et la résistance au mouvement des corps, au-delà de la prise en compte des phénomènes cinétiques qui en traduisent l'effet. More contraint Descartes à pointer la raison suffisante des forces sous-tendant les mouvements résultant du choc des corps, alors qu'il ne se fait pas faute pour sa part de considérer que chaque corps requiert un principe d'animation, voire un principe d'action perceptive. Certes, Descartes refuse toute conception de l'activité des corps qui supposerait l'intervention d'une âme de quelque genre ou degré qu'elle soit, mais Anfray établit que

les accidents des corps, au nombre desquels figurent les pouvoirs d'agir et de résister, ne dépendent pas de l'étendue abstraitement considérée, mais découlent de la *res extensa* en tant que ce sont des « modes de la substance étendue concrète » (157) – ce que nous pouvons interpréter comme si, la causalité sous-jacente étant admise, il suffirait de rendre compte des effets en découlant par les changements affectant les propriétés extensives des corps concernés. Dernier thème de l'échange : « les animaux-machines et la sensibilité animale », peut-être le plus révélateur, ne serait-ce qu'en raison de la vivacité de la critique émise par More : celui-ci qualifie la thèse des animaux-machines soutenue dans le *Discours de la méthode* d'« affirmation meurtrière et assassine » (*internecina et jugulatrix sententia*) (éd. Charles Adam et Paul Tannery, vol. V, p. 243). Référant surtout à *The Immortality of the soul* (1659), Anfray expose avec justesse le schème gradué des formes de vie selon More : simple, sensible et rationnelle, et l'attribution conséquente d'une rationalité propre à l'activité cogitative dont les animaux seraient capables. Descartes en appelle à deux raisons pour récuser cette attribution : la suffisance des explications mécanistes à rendre compte des processus physiologiques impliqués dans le comportement animal et l'absence chez l'animal d'aptitude à l'usage d'un langage qui serait le reflet et le vecteur de la cogitation. Or, en ce qui concerne le principe de vie et le sentiment chez l'animal, Descartes les distingue de la pensée, pour autant toutefois qu'ils « dépendent des organes corporels » (éd. Adam & Tannery, vol. V, p. 278). Aussi ne peut-on soutenir que Descartes, dans l'échange avec More, aurait admis quelque forme de sensibilité en tant que mode de cognition chez l'animal – ce qui supposerait une capacité réflexive, privilège réservé à la *mens*. « On ne trouve ainsi dans les animaux que le corrélat physiologique des sensations et émotions, non une sensibilité proprement dite (189). »

Cette étude nous révèle en définitive que Descartes, sollicité par More de réviser et consolider les fondements métaphysiques de sa philosophie naturelle, s'est refusé à évoquer des raisons suffisantes qui auraient outrepassé ce qu'il estimait intelligible pour nous dans la nature de Dieu, des corps et des esprits. D'où le maintien d'une ontologie sévère, mais prudente, à l'encontre des audaces spéculatives du néoplatonicien de Cambridge.

François DUCHESNEAU

Sandra BELLA, *La (Re)construction française de l'analyse infinitésimale de Leibniz* (Paris : Classiques Garnier, 2022), 15 × 22 cm, 548 p., bibliogr., index nominum, 82 fig., coll. « Histoire et philosophie des sciences ».

Cet ouvrage est visiblement une adaptation de la thèse soutenue par l'auteure sous un titre substantiellement différent<sup>1</sup>. Il traite de la manière dont un certain nombre de mathématiciens français se sont approprié ou ont contesté

1 - Sandra Bella, « De la géométrie et du calcul des infiniment petits : Les réceptions de l'algorithme leibnizien en France (1690-1706) », thèse soutenue en octobre 2018 à l'univ. de Nantes.

## Analyses d'ouvrages

le calcul différentiel de Leibniz et ses justifications, et ceci sur la période allant de 1690 à 1706. L'enjeu revendiqué de l'étude est de définir « l'horizon d'attente » à partir duquel les particularités et parfois les difficultés de l'appropriation du calcul des différentielles peuvent être comprises, l'expression désignant l'ensemble des connaissances, références et critères pratiques propres aux mathématiciens en question. Ces derniers vont *a priori* des différentes figures parisiennes, proches de l'oratorien Nicolas Malebranche, qui s'intéressent à réformer l'enseignement des mathématiques pour y intégrer l'analyse des infiniment petits, jusqu'aux protagonistes de la querelle des infiniment petits à l'Académie des sciences (1700-1706).

L'ouvrage est structuré autour de trois grandes parties qui sont autant de moments principaux dans cette « reconstruction » de l'analyse leibnizienne. La première s'inspire largement des travaux séminaux de Pierre Costabel ou André Robinet et porte sur la culture initialement partagée par les mathématiciens proches de Malebranche, avant le séjour parisien de Jean Bernoulli et ses leçons rémunérées au marquis de L'Hospital. On y distingue ce qui relève de la circulation des différentes méthodes du calcul des tangentes puis du calcul des quadratures par les méthodes des indivisibles. La seconde partie porte sur la longue genèse du traité majeur de L'Hospital publié en 1696, le premier à faire connaître dans une publication cohérente le nouveau calcul à partir d'une adaptation des leçons de Bernoulli. On y traite de la première réception parisienne du calcul de Leibniz puis de la genèse proprement dite du traité de L'Hospital et de ses particularités. La dernière partie propose semblablement une discussion serrée de la querelle sur les infiniment petits à l'Académie des sciences, en distinguant à nouveau entre la genèse de cette controverse puis la discussion de son déroulement et de ses enjeux. Cette double analyse du traité de L'Hospital et de la controverse académique en question est en quelque sorte la pierre de touche de l'ensemble de l'étude. Les parties précédentes doivent en effet permettre d'approcher les sources variées qui inspirent le traité de L'Hospital, puis les malentendus non seulement entre les partis opposés de ce débat, mais aussi entre Leibniz et ses partisans.

L'ouvrage, malgré son intérêt évident et le caractère très approfondi des analyses proposées, souffre de quelques faiblesses qui rendent sa lecture ou son exploitation parfois difficiles. D'un point de vue éditorial, sa finition est défectueuse : on trouve ainsi des coquilles en trop grand nombre, des fautes de grammaire ou d'orthographe non corrigées, des mots manquants, des formules erronées, des figures trop petites, incomplètes ou mal orientées. En outre le style est parfois ambigu ou trop elliptique. Ces défauts étaient évitables et créent un réel inconfort de lecture. Ils sont cependant compensés en partie par la présence systématique, pour chaque partie, d'une introduction et d'une conclusion succinctes et généralement éclairantes.

En termes méthodologiques, les intéressantes précisions données dans l'introduction générale n'éclairent pas complètement la façon dont certains auteurs, et pas d'autres, ont été sélectionnés pour l'explication de « l'horizon d'attente » des mathématiciens visés. On se serait ainsi attendu à ce que soit décrite la manière dont est inventorié le système des citations et références

des auteurs d'une période donnée, de façon à rendre claire la manière dont on entend définir la culture partagée par tel milieu, son système habituel de références, les points de rencontre ou au contraire d'ignorance.

D'un point de vue historiographique, l'ouvrage se fonde à la fois sur les discussions classiques qui ont pointé l'importance du « milieu malebranchiste » dans la première « reconstruction » du travail de Leibniz en milieu parisien, et les études les plus récentes qui ont permis d'éclairer les prémisses de l'histoire de l'analyse infinitésimale sur le long dix-septième siècle. Les commentaires de détail sur ces études ne paraissent proposer que quelques inflexions aux études existantes, sans remise en cause majeure. Cependant l'étude ne fait pas référence à un travail aussi incontournable que la magistrale étude de Niccolò Guicciardini *Reading the Principia* (Cambridge Univ. Press, 1999), qui traite du problème très similaire de la réception de l'ouvrage de Newton et des mathématiques sous-jacentes dans différents milieux, dont les cercles bâlois et parisiens qui intéressent l'auteur. Cette lacune touche aussi au problème méthodologique déjà relevé, car la méthode suivie par Guicciardini aurait pu servir de référence utile. Elle aurait notamment permis de mieux cerner la « scène européenne » qui permet à Leibniz et aux mathématiciens bâlois de diffuser puis d'enrichir le calcul, suivant une stratégie délibérée porteuse en elle-même d'un sens philosophique, comme Michel Serres ou Marc Parmentier l'ont bien montré. En d'autres termes : Leibniz ou Jean Bernoulli sont-ils ou non des parisiens « proches de Malebranche » (ou de l'Académie des sciences)? Au regard de la thèse principale de l'ouvrage, ils n'en sont pas. Au regard de leur présence constante et assidue dans tous les débats publics et « privés » (par correspondance) qui sont très bien décrits par l'auteur, ils sont à l'évidence partie prenante de cette « reconstruction » parisienne. Il y a là un point aveugle étrange.

Mais cette remarque peut être retournée et offre peut-être une clé de lecture pour ce qui fait l'intérêt essentiel de cet ouvrage. Pour parler en effet à la manière de Lucien Febvre récemment commenté par Éric Brian<sup>2</sup>, le cœur de l'ouvrage m'a paru porter sur la définition aussi précise que possible du « climat des sciences » parisien autour des questions d'analyse infinitésimale, au tournant des xvii<sup>e</sup> et xviii<sup>e</sup> siècles. À cet égard, il n'est pas certain que l'emphase mise sur la question des débats autour de l'analyse leibnizienne, d'échelle essentiellement européenne, soit le bon objet pour cerner ce climat particulier. Il tend en effet à laisser dans l'ombre des objets à mon sens plus robustes et lisibles, comme la réaction globale du milieu parisien visé à la nouvelle analyse, en termes de diffusion des mathématiques (écriture d'ouvrages, création de « cercles d'apprentissage »), de nouvelles recherches (comme celles de Varignon), de réseaux de correspondance. Ces efforts sont soutenus aussi bien par les oratoriens et affiliés que par certains académiciens comme Varignon ou surtout Fontenelle et ils sont bien plus caractéristiques de ce milieu parisien que ne le sont les seuls débats autour du calcul infinitésimal. À titre d'exemple, j'ai trouvé plus instructif l'analyse de la « genèse » du traité de 1696, à la croisée des leçons de Bernoulli, de la lecture prégnante de Barrow

2 - Lucien Febvre, *Histoire et sciences*, éd. Éric Brian (Paris : EHESS, 2023).

## Analyses d'ouvrages

et de l'héritage didactique janséniste-oratorien, que l'analyse de la controverse des infinitésimaux, qui de l'aveu même de l'auteure n'est ni le seul ni le meilleur témoin révélant la prégnance de l'héritage intellectuel et pratique en question.

Vu sous cet angle, on apercevra mieux ce qui fait l'intérêt du mode d'écriture retenu pour cette étude, qui prend au sérieux l'analyse détaillée et approfondie des arguments et des manières d'écrire de plusieurs des protagonistes parisiens pour en dégager les caractéristiques essentielles. C'est sous ce point de vue que l'importance de plusieurs protagonistes majeurs, habituellement vus comme des « seconds couteaux » de la « grande histoire » du calcul infinitésimal, Malebranche, Varignon, Rolle, Gallois, Fontenelle, apparaîtra mieux, ainsi que le grand intérêt de ce livre, au-delà de ses défauts plus apparents que réels. Cette « fécondité heuristique » de l'étude en question, a du reste été bien montrée par le colloque récent sur Varignon dont l'auteure était co-organisatrice. Plus généralement, l'étude livre en conclusion des clés intéressantes de lecture pour les travaux plus tardifs mais entièrement connexes à ces efforts, comme ceux de Reyneau ou de Guisnée, dont on sait qu'ils serviront de références aux « mécaniciens analystes » de la génération suivante, comme Clairaut, Maupertuis ou d'Alembert.

Alain BERNARD

Jenny BOUCARD, Christophe ECKES (dir.), *Arranger, disposer, combiner : Théories de l'ordre dans les sciences, les arts d'ornement et la philosophie* (Paris : Hermann, 2023), 17 × 24,4 cm, 440 p., coll. « InterSciences ».

Comme son titre l'indique, cet ouvrage s'intéresse aux recherches et aux pratiques scientifiques et artistiques autour de l'ordre, sur le plan expérimental comme sur le plan conceptuel. L'ambition des auteurs est donc très grande mais le livre évite heureusement la dispersion et rend compte de façon finalement assez homogène de ces théories et pratiques de l'ordre dans les différents domaines du savoir et de l'art. Le rôle des mathématiques dans cette entreprise est évidemment premier, sans être exclusif. La disposition des objets dans les sciences et les arts donne lieu à des études de cas qui permettent d'esquisser quelques points communs et conclusions sur les approches de l'ordre au XIX<sup>e</sup> siècle.

Les auteurs reprennent plus ou moins à leur compte une intuition de John Théodore Merz (1840-1922) quant au rôle de l'idée d'ordre dans le développement des différents domaines de la pensée scientifique au XIX<sup>e</sup> siècle et quant aux liens entre ordre, arrangement, combinaison et forme. La recherche fait apparaître des points fondamentaux : l'ordre et l'organisation de la nature, les relations d'ordre, l'ordre lié aux notions d'arrangement, de combinaison et de symétrie. Ces points fondamentaux d'une typologie de l'ordre se retrouvent dans les divers savoirs scientifiques au XIX<sup>e</sup> siècle. Les théories de l'ordre furent d'abord construites par des mathématiciens comme Poincaré. Une mathématique de l'ordre est le fondement théorique; l'ordre est aussi

inscrit dans l'espace, c'est le cas de la cristallographie et de l'organisation biologique. J. Boucard et C. Eckes considèrent d'ailleurs que « les premières théories cellulaires ... s'inspirent de manière ambiguë du modèle cristallographique » (44).

Depuis Romé de L'Isle dans les années 1770, et surtout avec René-Just Haüy, la recherche s'oriente vers la structure du cristal, non seulement géométrique (Romé de L'Isle) mais définie par la figure et l'arrangement de ses constituants élémentaires (Haüy). Chaque couche cristalline dépend de la figure de ceux-ci : en 1784, Haüy définit la genèse et la régularité du cristal par « l'arrangement symétrique et régulier des molécules cristallines entre elles » (84). Cet ordre géométrique et cristallographique devient un objet de recherche qui suppose des institutions : ce sera, à travers l'Europe, la création des écoles des mines. À la suite de cette fondation de la recherche minéralogique et cristallographique, le début du XIX<sup>e</sup> siècle connaîtra de nets progrès : découverte du rôle de la symétrie dans la cristallisation (Haüy et Weiss), travaux d'optique (Biot) pour rendre visible le système cristallin, utilisation des techniques mathématiques pour modéliser les faces et symétries des cristaux (Lamé, Lévy, Whewell). Le rôle fondamental de la symétrie est finalement approfondi par Delafosse dans les années 1830-40, il en fait le principe fondateur de la physique des cristaux. Cet ordre cristallin assume une structure spatiale mais il dépend d'un arrangement et d'une disposition d'éléments matériels, d'où son importation en chimie, dès les années 1830. La symétrie et le pouvoir rotatoire des molécules en optique sont la base d'une nouvelle approche des cristaux, la définition de la chiralité attribuée à Pasteur « émerge du travail collectif de toute une génération » (150).

L'idée de l'existence d'un ordre naturel associé à la symétrie apparaît à la même époque en botanique. Le chapitre sur les travaux d'Auguste Bravais souligne l'existence de transferts de savoir entre les recherches botaniques et cristallographiques de cet auteur. L'insertion et la symétrie des feuilles ainsi que la disposition des fleurs sur l'axe d'inflorescence font l'objet de modélisations mathématiques pour rendre compte d'un ordre naturel dans les dispositions végétales (173-178). Ces recherches furent examinées par des naturalistes comme Brongniart et Turpin (en 1837) mais aussi par les mathématiciens Poisson et Sturm, et elles n'eurent qu'une postérité limitée en termes de modélisation mathématique des divergences des végétaux curvisériés. Les mémoires cristallographiques d'Auguste Bravais sont en continuité avec ses études botaniques et connurent, quant à eux, « une réception étendue et durable » (197).

La mise en place de la théorie cellulaire est à resituer, selon Stéphane Tirard et Laurent Loison, dans la « question de l'organisation végétale et de sa mise en place progressive au cours du développement » (210). Le rôle générateur du cambium et l'influence du modèle cristallographique sont vus ici comme essentiels dans la compréhension de l'histogenèse végétale et de l'organisation cellulaire. Le premier modèle de genèse des tissus végétaux est redevable à Duhamel du Monceau (*Physique des arbres* [1758]) et à Brisseau-Mirbel (*Traité d'anatomie et de physiologie végétale* [1802]), pour leurs découvertes sur le cambium et sur son rôle organisateur. La révision du système histogé-



## Analyses d'ouvrages

nétique de Mirbel (1833 et 1839) et les travaux de Gabriel Delafosse, étendant les méthodes cristallographiques aux êtres vivants, préludaient à la proposition de la première théorie cellulaire par Schleiden, en 1838. Le mémoire de Schleiden se présente comme une recherche d'explicitation du processus formateur de l'organisation végétale autour du cytoblaste. Dans cette perspective, le processus de genèse d'une cellule végétale fit l'objet d'une tentative de modélisation (226). Les auteurs concluent qu'en « inscrivant son travail dans le sillage des débats auxquels Mirbel et Raspail avaient participé, en suggérant le rôle formatif du “cytoblaste”, la théorie de la phytogenèse de Schleiden pouvait très facilement être réinterprétée dans les termes de la cristallographie, comme Schwann le fit immédiatement » (226). La théorie cellulaire apparaît alors comme une conséquence, sur le modèle de l'ordre cristallographique.

Dans la suite des recherches concernant le végétal et la botanique, le dessin a mobilisé à la même époque les travaux sur l'ordre, les symétries, les répétitions, en vue de penser la distribution des motifs. Le végétal est devenu le lieu des symétries ornementales (296), le lieu de mise en évidence de structures géométriques. Les dessinateurs de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (tels Ruprich-Robert et Bourgoïn) ne se sont pas limités à l'étude et à la reproduction de l'ornement, ils ont aussi fait œuvre de dessin d'art, voire de dessin scientifique, et ils ont représenté des végétaux à des fins de description botanique ou ornementale. Dresser, quant à lui, préconise un traitement non-naturaliste des formes végétales, et il écrit (en 1862) en vue de rappeler l'ordre et les lois du monde végétal, dans une perspective téléologique.

Le livre examine l'émergence d'une théorie de l'ordre au XIX<sup>e</sup> siècle en mathématiques, en minéralogie, cristallographie et chimie, en biologie et en botanique, dans l'art et le dessin d'ornement. Les travaux de cristallographie et certaines recherches mathématiques apparaissent comme des lieux de fondation et d'hybridation des savoirs sur les théories de l'ordre. Qu'en est-il de la philosophie ? Cournot, qui évoque la théorie de l'ordre dans les années 1840 (p. 371) l'assimile à la théorie des combinaisons. Dès 1847, il estime que « la connaissance est une recherche de l'ordre » (379). Cette préoccupation philosophique centrée sur l'ordre viendrait d'un projet d'unification des connaissances. La critique philosophique de Cournot n'exclut pas une dimension ontologique du concept d'ordre. En conclusion, il faut saluer la parution de ce livre, très documenté, en grande partie centré sur les mathématiques et la cristallographie, cependant très complet. L'absence de propositions alternatives serait peut-être la seule limite de l'ouvrage.

Olivier PERRU

Faisal KENANAH, *Les Animaux chez Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī : Classement et influences des transmissions (Aristote – Ibn al-Bīṭrīq – Ḡāḥiz)* (Bruxelles : Éditions Safran, 2023), 17 × 24 p., 219 p., bibliogr., index, table, coll. « Cultures et langues orientales ».

*Les Animaux chez Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī* porte sur le chapitre zoologique du *Kitāb al-imtā' wal-mu'ānasa*, ouvrage majeur d'Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī (932-

1023), figure marquante du *adab* et de l'encyclopédisme arabe médiéval dans un siècle où se poursuivent traductions (voire re-traductions) et commentaires des sources et où émergent de grandes figures comme al-Fārābī (872-950) et Avicenne (980-1037). Le *Kitāb al-imtā' wa-l-mu'ānasa*<sup>1</sup> (*K. al-imtā'*), qui aurait été achevé entre 983 et 985, est composé à l'image des *Mille et une nuits*, c'est-à-dire que ses chapitres sont répartis en 40 « nuits » ou entretiens nocturnes traitant d'un ou plusieurs sujets entre al-Tawḥīdī et le vizir Ibn Sa'dān (vizir sous les Bouyides chiites).

Faisal Kenanah est maître de conférences en arabe à l'université de Caen. Depuis l'achèvement de sa thèse « La structure et les thèmes du *Kitāb al-imtā' wa-l-mu'ānasa* », il poursuit ses recherches sur le personnage et l'œuvre d'al-Tawḥīdī, apportant une contribution majeure à une lecture des pratiques scientifiques et intellectuelles au x<sup>e</sup> s., notamment à travers l'étude des *maḡālis*, lieux d'échanges et de transmission des savoirs (qui ont fait l'objet de deux rencontres scientifiques à Caen et Rennes en 2022) et des questions relatives à la traduction et à la traductologie, notamment autour de la thématique qui nous occupe : les animaux<sup>2</sup>.

Comme il le rappelle dans son introduction, son intérêt pour le versant zoologique de l'œuvre d'al-Tawḥīdī a émergé à la suite des diverses rencontres scientifiques consacrées à l'étude et à la transmission des textes zoologiques médiévaux<sup>3</sup>, rencontres qui s'inscrivent dans le renouveau historiographique de lecture des textes zoologiques anciens avec un regard pluridisciplinaire, propulsé par les travaux de Ahmed Aarab et Philippe Provençal et réévaluant la contribution des savants arabes médiévaux aux savoirs naturalistes. *Les Animaux chez Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī* s'inscrit dans le prolongement du travail que l'auteur avait entamé avec la traduction française des ix<sup>e</sup> et x<sup>e</sup> nuits du *K. al-imtā'* (sur les *aḥlāq* de l'homme et de l'animal) parue en 2019<sup>4</sup>, nous invitant à poursuivre l'exploration d'une page de l'histoire de la zoologie arabe.

Dans ce travail, F. Kenanah examine la question des influences savantes et des chaînes de transmission des savoirs zoologiques arabes et gréco-arabes, à travers leur traduction et/ou leur réception et assimilation. Il s'agit d'une étude comparative diachronique qui souhaite mettre au jour les liens, les continuités, les points de rupture et les divergences entre ces savoirs en prenant comme point de départ – ou peut-être d'arrivée (?) – le chapitre zoologique du *K. al-imtā'* d'al-Tawḥīdī et en revenant sur trois sources essentielles : (1) *le corpus naturaliste aristotélicien*, référence majeure des savants médiévaux, dont la traduction arabe attribuée à Ibn al-Bitriq (815) est passée en latin

1 - Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī, *Kitāb al-imtā' wa-l-mu'ānasa*, éd. A. Amin et A. al-Zayn (Le Caire : 1953).

2 - Faisal Kenanah, Traduire les animaux en arabe et en français : quelques réflexions à partir d'un ouvrage médiéval du x<sup>e</sup> siècle, *Histoire culturelle de l'Europe*, à paraître.

3 - Journée d'étude du groupe Ichtya, Caen, 2019 ; congrès de la SFHST, Montpellier, 2021 ; forum *Insaniyyāt*, Tunis, 2022.

4 - Al-Tawḥīdī, *Les traits de caractère des hommes et des animaux dans le Kitāb al-Imtā' wa-l-mu'ānasa*, présenté, traduit et annoté F. Kenanah (Paris : L'Harmattan : 2019).

## Analyses d'ouvrages

par l'intermédiaire de Michel Scot (vers 1220), puis (2) *la tradition zoologique arabe*, représentée ici par le *Kitāb al-ḥayawān*<sup>5</sup> du prosateur et naturaliste al-Ġāḥiẓ (776-868) qui fait l'objet d'un intérêt grandissant chez les historiens des sciences, enfin (3), le *Peri zoon* du grammairien grec Timothée de Gaza (v-iv<sup>e</sup> s. av. J.-C.), dont des fragments d'une version paraphrastique ont connu une traduction anglaise par Bodenheimer et Rabinowitz en 1949, et qui semble avoir été connu de manière indirecte (on ne connaît pas de traduction arabe à ce jour<sup>6</sup>) chez quelques naturalistes et encyclopédistes arabes médiévaux dont al-Tawḥīdī (qui ne le cite pas nommément dans son *K. al-imtāʿ*), et plus tard al-Marwazī (xii<sup>e</sup> s.) qui le cite expressément.

Le personnage d'al-Tawḥīdī relève d'un intérêt non négligeable : en plus d'être un encyclopédiste et un prosateur renommé, il est un des lecteurs les plus assidus de l'œuvre ḡāḥiẓienne et un des copistes du *Kitāb al-ḥayawān*. Est-il pour autant un continuateur ou un héritier de l'œuvre naturaliste ḡāḥiẓienne ou simplement un témoin de cette tradition zoologique issue elle-même d'un patrimoine aristotélicien remanié, confronté à la culture locale héritière de savoirs pluriels ? Tel est le questionnement avancé par F. Kenanah, exprimé en ces termes : « savoir si Abū Ḥayyān al-Tawḥīdī a utilisé l'ouvrage d'al-Ġāḥiẓ comme un moyen pour parvenir à celui d'Aristote, ou bien s'il a copié directement sur Aristote » (p. 12). Pour ce faire, l'auteur confronte les textes d'al-Ġāḥiẓ et d'al-Tawḥīdī dans leur version originale, accompagnés de leur traduction française, avec ceux de l'*Histoire des animaux*, accordant un intérêt particulier aux différences entre les versions arabes du corpus aristotélicien (celle d'Ibn al-Bitrīq vers 815 et une de ses éditions récentes par 'Abd al-Raḥmān Badawī en 1977-78) et des traductions françaises récentes (celles de Pierre Louis<sup>7</sup>).

Après une intéressante entrée en matière rappelant des éléments importants de contexte et renseignant sur les débats autour de la réception du corpus naturaliste aristotélicien, l'ouvrage se décline en trois parties thématiques : d'abord une lecture croisée entre Aristote, al-Ġāḥiẓ, Timothée de Gaza et al-Tawḥīdī, puis, dans un deuxième temps, un aperçu plus focalisé sur l'influence de Timothée de Gaza sur al-Tawḥīdī, et enfin un bref détour vers les spécificités de la description zoologique dans les 9<sup>e</sup>, 17<sup>e</sup> et 24<sup>e</sup> « nuits ». L'ouvrage est préfacé par le philologue arabisant spécialiste de l'histoire de la géographie et des sciences naturelles arabes, Jean-Charles Ducène, et un index bilingue d'environ 130 noms d'animaux, offrant un riche support pour les chercheurs, clôt le texte principal.

5 - Al-Ġāḥiẓ, *Kitāb al-ḥayawān*, éd. 'Abd al-Salām Muḥammad Hārūn (Le Caire : 1965-1969).

6 - Remke Kruk, Timotheus of Gaza's On animals in the Arabic tradition, *Le Muséon*, 114/3 (2001), 355-387.

7 - Aristote, *Histoire des animaux*, livres I-X, éd. et trad. Pierre Louis, 3 vol. (Paris : Les Belles Lettres, 1964-1969). À ce propos, notons qu'une édition nouvelle constitue un autre point d'appui intéressant : *The Arabic version of Aristotle's Historia animalium : Book I-X of Kitāb al-ḥayawān*, éd. Lourus S. Filius (Brill, 2018 ; voir en particulier le chapitre rédigé par Remke Kruk, p. 15-22).

La 1<sup>re</sup> partie se décline en 66 chapitres chacun dédié à un animal ou un groupe d'animaux, où sont présentées propriétés physiologiques et comportementales (reproduction, affinités / hostilités, etc.) de l'homme, de différents groupes de poissons, d'animaux amphibies, des ovins, en passant par la viviparité du dauphin et de longs développements sur le chien (p. 121-129). La 2<sup>e</sup> partie s'intéresse aux passages isolés ou communs entre al-Tawḥīdī et Timothée de Gaza, et elle contient 84 chapitres où on lit de nombreux passages sur les bovidés (168) et diverses descriptions d'oiseaux comme le ramier, le milan, l'hirondelle, le faisan (174-175) et autres oiseaux de proie, aiglons (189), vautours (190), et faucons (191).

Quelques éléments intéressants pour le philologue et l'historien de la biologie se dégagent à la lecture de ce travail. Par exemple, la désignation du rhinocéros dont les multiples zoonymes arabes (*karkaddan*, *ḥimār hindī*, *ḥariš*) ont suscité un long débat chez les penseurs arabes médiévaux et diverses interprétations chez leurs lecteurs modernes, informe du parcours lexical des zoonymes et du rôle des diverses influences linguistiques dans la constitution d'un vocabulaire scientifique. Le *ḥimār hindī* (l'âne de l'Inde d'Aristote<sup>8</sup> est identifié comme le rhinocéros *karkaddan* (zoonyme d'origine persane) chez al-Ġāḥiẓ<sup>9</sup> qui utilise également le zoonyme *ḥariš*<sup>10</sup> qui, lui, est assimilé à la licorne chez al-Tawḥīdī (p. 71-74). Aussi, al-Tawḥīdī<sup>11</sup> nomme l'âne de l'Inde d'Aristote *ḥimār waḥṣī* (p. 53) alors qu'il utilise également ce même zoonyme pour désigner l'onagre ou littéralement « âne sauvage<sup>12</sup> », ce à quoi ce terme renvoyait chez al-Ġāḥiẓ et d'autres naturalistes et qui désigne actuellement le zèbre.

De même, le cas de la panthère témoigne des obstacles épistémolinguistiques que rencontre l'historien de la zoologie dans la détermination des noms d'animaux dans les textes anciens, et il réaffirme la nécessité d'une relecture à la fois biologique et philologique des textes traduits et d'une exploration de la tradition textuelle et des voies de transmission. C'est le retour à la source aristotélicienne en arabe qui indique que le zoonyme grec désignant la panthère a été traduit par *fahd* (qui désigne en arabe le guépard, la panthère étant le *namir*). Les zoonymes et les catégories zoologiques ont subi de nombreuses variations sémantiques diachroniques et leur lecture rétrospective qui fait l'économie de l'approche historique et lexicologique accroît le risque d'erreurs d'identification, sachant que s'ajoutent les nombreuses erreurs de traduction, voire même de transcription par les copistes : l'exemple de la confusion *fahd* / *qird* (singe) en est une illustration (p. 140).

Le lecteur observe d'un chapitre à l'autre le passage d'une information zoologique d'un savant à un autre, d'une époque à une autre, son assimilation et/ou sa discussion et la spécificité de chaque savant. Ce parcours est illustré notamment par la question de la présence de l'os dans le cœur des che-

8 - Aristote, éd. Louis, *op. cit.* in n. 7, II.1, 499 b 19-20.

9 - Al-Ġāḥiẓ, *op. cit.* in n. 5, VII, 123.

10 - Al-Ġāḥiẓ, *op. cit.* in n. 5, VI, 27-28.

11 - Al-Tawḥīdī, *op. cit.* in n. 1, I, 174.

12 - Al-Tawḥīdī, *op. cit.* in n. 1, I, 184.

## Analyses d'ouvrages

vaux et de certains bœufs (p. 41-42) qui apparaît dans la traduction arabe de l'*Histoire des animaux*<sup>13</sup>, qui est ensuite discutée par al-Ġāḥiẓ qui dit l'avoir lue chez Aristote, mais ne la confirme pas<sup>14</sup>, et qui sera toutefois réaffirmée et relayée par al-Tawḥīdī<sup>15</sup>. On retrouve cette démarche critique d'al-Ġāḥiẓ – qu'al-Tawḥīdī semble ne pas adopter – quand il remet en cause l'existence d'une hybridation entre le tigre et le chien dont serait issu le « chien indien », pourtant affirmée par Aristote<sup>16</sup>, retrouvée chez Timothée de Gaza et reprise par al-Tawḥīdī. C'est un élément sur lequel F. Kenanah n'insiste pas : contrairement à ce qu'affirme l'auteur (p. 21), al-Ġāḥiẓ se réfère de nombreuses fois à Aristote, qu'il cite parfois littéralement<sup>17</sup> et qu'il se permet de critiquer.

Cet ouvrage, source abondante de descriptions anatomiques et physiologiques, constitue ainsi une mine d'informations zoologiques accessibles à l'historien de la zoologie arabe autant qu'au philologue et à l'historien. L'historien de la zoologie et le médiéviste pourront apprécier, au-delà du rôle d'Aristote, la place de Timothée de Gaza dans la circulation des savoirs grecs et byzantins, ayant drainé des connaissances issues d'autres références comme Élien ou Oppien d'Apamée<sup>18</sup>. Si al-Ġāḥiẓ a constitué un pivot important des connaissances zoologiques de son temps, à travers sa lecture commentée et critique d'Aristote et ses observations personnelles, al-Tawḥīdī, souhaitant que son œuvre « constitue un mémorandum et un profit [pour les autres]<sup>19</sup> », aura été un compilateur plus soucieux de transmettre de manière didactique un savoir naturaliste que de citer ses sources avec précision ou de recourir à des observations. Ainsi, le chapitre zoologique du *K. al-īmṭā'* constitue un intéressant témoignage de la transmission des savoirs zoologiques gréco-arabes, mis au jour par F. Kenanah qui nous offre, avec ce travail novateur, une immersion dans la construction du patrimoine intellectuel et scientifique arabe et sa continuité à travers la richesse de la lecture croisée entre les *sources* (Aristote, Timothée de Gaza), l'existence d'une éventuelle *tradition* (Ġāḥiẓ), leur *transmission* (réception, commentaires) et leur part d'originalité et de contribution propre.

L'auteur a fait montre d'un travail minutieux et fouillé de repérage et de sélection des passages d'al-Tawḥīdī inspirés des sources choisies (Aristote, al-Ġāḥiẓ, Timothée), tâche d'autant plus complexe et ardue qu'al-Tawḥīdī lui-même ne cite pas précisément ses sources. En outre, par son travail remarquable de traduction ou de relecture de certaines d'entre elles, cet ouvrage offre un renouvellement des analyses de la pensée naturaliste arabe médiévale, nourrissant le débat autour des doutes sur l'identification des zoonymes, appuyant l'importance de la vision philologique sur l'étude de la transmission des savoirs et mettant en lumière les obstacles rencontrés par les historiens

13 - Aristote, éd. Louis, *op. cit.* in n. 7, II.15, 506 a.

14 - Al-Ġāḥiẓ, *op. cit.* in n. 5, VI, 440-441.

15 - Al-Tawḥīdī, *op. cit.* in n. 1, I, 169.

16 - Aristote, éd. Louis, *op. cit.* in n. 7, VIII.28, 607 a. Al-Ġāḥiẓ, *op. cit.* in n. 5, I, 183-185.

17 - Il en est ainsi du crocodile et de l'araignée. Al-Ġāḥiẓ, *op. cit.* in n. 5, I, 310; V, 411-412. Aristote, éd. Louis, *op. cit.* in n. 7, 492 b 24; IX.39, 623 a 10.

18 - Kruk, *op. cit.* in n. 6.

19 - Al-Tawḥīdī, *op. cit.* in n. 1, I, 160.

des sciences dans l'interprétation des textes anciens. Cette étude, qui mérite d'être étendue à d'autres textes médiévaux à dimension zoologique, nous invite à explorer de nouveau les textes zoologiques grecs et leur transmission dans une perspective comparatiste avec les textes de la tradition zoologique arabe.

Meyssa BEN SAAD

Gregory RADICK, *Disputed inheritance : The battle over Mendel and the future of biology* (Chicago / Londres : The University of Chicago Press, 2023), 630 p.

Dans l'histoire de la biologie comme dans l'histoire des sciences en général, il y eut des controverses souvent vues comme fondatrices, dont l'issue aurait correspondu à de véritables moments d'inflexion du cours même de l'histoire. Celle entre les premiers mendéliens et les biométriciens est classiquement comprise comme l'une d'entre elles. Elle opposa durant quelques années (1900-1906) les partisans d'une nouvelle compréhension discontinuiste de l'hérédité, la génétique, aux tenants d'une approche statistique et strictement descriptive de la corrélation des formes entre les générations. Alors que les premiers se constituèrent rapidement en école autour de William Bateson à Cambridge, les seconds se limitèrent pour l'essentiel aux seuls Karl Pearson et surtout Raphael Weldon, alors professeur à Oxford. Cette controverse, essentiellement britannique donc, peut se décliner en une série d'oppositions qui ont donné lieu à quantité d'études historiographiques : opposition entre le discontinu et le continu, le qualitatif et le quantitatif, l'action éliminatrice ou créatrice de la sélection naturelle, etc. On aurait pu penser que l'essentiel avait déjà été dit sur ces oppositions et qu'il aurait été difficile d'en renouveler notre compréhension. C'est pourtant à un tel pari que nous invite l'historien Gregory Radick dans son ouvrage-somme *Disputed inheritance : The battle over Mendel and the future of biology*, paru il y a quelques semaines aux presses de l'université de Chicago.

Ce livre est l'aboutissement d'un projet de recherche long de plus d'une décennie qui a conduit Radick à s'immerger comme personne auparavant dans cette littérature. La première qualité de cette enquête est donc indéniablement son érudition. À côté de l'étude des sources publiées, déjà conséquentes, on trouve également une méticuleuse analyse des documents d'archives et en particulier de l'abondante correspondance de Bateson, Weldon et Pearson (mais aussi Galton), qui permet de suivre presque au jour le jour la manière dont cette controverse scientifique a été vécue par ses différents protagonistes. À cela s'ajoute le souci de prendre en compte les nombreuses sources secondaires dont Radick nous montre les acquis mais aussi les limites, qu'il tente ici de dépasser (on regrettera simplement le système peu commode de notes de fin de volume qui rend les aller-retours entre les sections assez fastidieux). La dissection des années les plus vives de cette opposition est de ce fait sans précédent et marque un nouveau jalon dans l'historiographie de cet épisode fameux.

On aurait tort cependant de réduire ce livre à une micro-histoire exhausti-

## Analyses d'ouvrages

vement documentée d'un moment paroxystique d'affrontement entre deux visions incommensurables de l'hérédité biologique. Radick offre au lecteur bien plus que cela, et pour deux raisons principalement. La première est tout le soin qu'il prend à réinscrire ce moment dans la longue durée, c'est-à-dire dans l'épaisseur de la trame qui a présidé à l'émergence de la notion d'hérédité biologique. En amont de l'analyse de la controverse elle-même (la partie centrale de l'ouvrage, la *battle* du titre), plusieurs chapitres font le point sur la manière dont l'hérédité a été constituée comme problème biologique tout au long du XIX<sup>e</sup> siècle. Ces chapitres impressionnent à nouveau par leur degré d'information et sont dévolus à la restitution des projets de Mendel, Darwin et Galton. Selon Radick, c'est seulement chez Galton que l'on trouve de manière indubitable une théorie et une métrique de l'hérédité biologique, d'autant plus importante qu'elle inspira très directement à la fois la biométrie de Weldon et Pearson et la génétique mendélienne de Bateson. Rien de tel, selon lui, chez Mendel, dont les cultures expérimentales de pois avaient comme objectif d'établir une « loi de développement des hybrides », c'est-à-dire une relation algébrique rendant compte de la distribution des caractères différentiels au fur et à mesure des générations. Rien de tel non plus chez Darwin, chez qui l'« hypothèse provisoire de la pangenèse » était une théorie censée subsumer un très vaste ensemble de faits, comme par exemple la régénération des tissus, bien au-delà de ceux touchant à l'hérédité proprement dite.

La seconde raison qui confère à ce livre une dimension particulière est la méthodologie qui y est revendiquée et mise en pratique. Depuis plusieurs années, Gregory Radick, en compagnie et en dialogue avec d'autres, comme Hasok Chang notamment<sup>1</sup>, est en effet un des partisans les plus engagés au sein de l'histoire contrefactuelle<sup>2</sup>, domaine lui-même parmi les plus productifs de l'historiographie (au-delà de la seule historiographie des sciences). Selon cette approche, l'interprétation historique gagne énormément à se demander ce qu'il aurait pu advenir si tel ou tel événement s'était déroulé différemment. L'histoire contrefactuelle prend donc à bras le corps la question de la contingence du cours de l'histoire, question d'autant plus décisive en histoire des sciences que contingence (de l'histoire) et vérité (de la science) sont deux dimensions particulièrement difficiles à articuler. Une autre histoire, conduisant à une autre science, aurait-elle été possible ? Au moment de son décès prématuré, le 13 avril 1906, du fait d'une pneumonie, Weldon était sur le point de publier son grand livre sur l'hérédité biologique (dont il nous resterait un manuscrit relativement abouti). Cette publication aurait-elle infléchi le cours de l'histoire ? Aurait-elle conduit à la génétique chromosomique puis moléculaire par un autre chemin que le mendélisme si bruyant de Bateson et son école ? C'est à cet ensemble de questions qu'est dévolue la troisième partie de l'ouvrage (« Beyond »). L'ambition de cette partie n'est pas de mettre à bas l'état actuel de la science, mais plutôt d'interroger l'origine du géno-centrisme du discours biologique et, plus encore, le déterminisme génétique omniprésent dans les mentalités du grand public. La thèse de Ra-

1 - Hasok Chang, *Is water H<sub>2</sub>O ? Evidence, realism and pluralism* (Springer, 2012).

2 - Gregory Radick, *Why what if ?*, *Isis*, 99 (2008), 547-551.

dick est que ce biais cognitif, désormais enraciné comme a priori culturel, trouverait son origine dans la manière dont Bateson a construit le premier mendélisme, dans le simplisme de ses positions, et dans la façon dont il s'est incarné très rapidement dans un récit standard apologétique où Mendel et ses pois eurent tôt fait de tenir le rôle d'acte fondateur. Il en aurait été peut-être tout autrement si Weldon avait pu faire paraître son livre. Une science de l'hérédité plus attentive au rôle causal de l'environnement en serait probablement ressorti, qui aurait eu le mérite, selon Radick toujours, de parvenir au même niveau d'élaboration scientifique tout en limitant, sinon en annulant, les excès essentialistes du « tout génétique ».

De manière incontestable, l'extrême fluidité de l'écriture, la richesse de l'information historique ainsi que la hardiesse des thèses avancées ne peuvent qu'inviter à la discussion. C'est donc à celle-ci que s'emploie le reste de la présente recension, d'abord en s'attachant à des interprétations et des questions ponctuelles avant d'aborder plus directement l'argument principal de l'ouvrage. Nos premières remarques et interrogations portent sur la première des trois parties du livre, où l'auteur dresse la scène qui verra la controverse se dérouler. Avant d'en venir au projet de Galton – magnifiquement restitué dans sa complexité et son évolution – Radick s'intéresse dans le détail aux travaux de Mendel puis de Darwin dans son chapitre inaugural intitulé « Who needs a science of heredity ». Dans le sillage des travaux de Robert Olby<sup>3</sup>, il existe depuis quelques décennies une tradition de recherche qui a visé à montrer que Mendel n'était pas mendélien, et ne pouvait être tenu pour un précurseur de la génétique mendélienne. Les historiens ont souhaité ici faire œuvre utile contre l'histoire anachronique produite par les généticiens qui, à compter de 1900, ont unanimement vu dans le mémoire de 1866 l'acte fondateur oublié d'une nouvelle science, la leur. Cette volonté de recomprendre Mendel tel qu'en lui-même est tout à fait nécessaire, mais elle a peut-être abouti à l'excès inverse : faire de ce mémoire un travail qui n'aurait aucun lien non seulement avec notre génétique mais même avec la thématique de l'hérédité. Il nous semble que c'est dans cet excès que tombe à certains moments l'analyse proposée dans ce livre. Il est bien entendu que la question fondamentale que pose Mendel est celle de la manière dont les hybrides se comportent au fil des générations. Il est bien entendu que Mendel n'a pas à proprement parler développé une théorie particulière de l'hérédité. Mais il n'empêche que ses travaux sur le pois portent sur la distribution intergénérationnelle de caractères observables, soit précisément l'objet d'étude de la génétique dans sa phase mendélienne. La difficulté du cas Mendel, comme y ont récemment insisté Hans-Jörg Rheinberger et Staffan Müller-Wille<sup>4</sup>, est son entre-deux : parti de la tradition des « hybrideurs », Mendel la subvertit de manière significative en restreignant son travail à un seul organisme (modèle) et en se concentrant exclusivement sur sept paires de caractères. Ceci l'amène à une rationalisation qui effectivement n'est pas encore celle de la génétique mendélienne (car la théorie cellulaire, au mitan des années 1860, n'a

3 - Robert Olby, Mendel, *History of science*, 17 (1979), 53-72.

4 - Hans-Jörg Rheinberger, Staffan Müller-Wille, *The Gene : From genetics to postgenomics* (The Univ. of Chicago Press, 2018).



## Analyses d'ouvrages

encore rien à dire sur les chromosomes, la mitose et la méiose), mais qui pour autant ne lui est pas non plus complètement étrangère. En bref, il nous paraît excessif de dissocier aussi complètement l'entreprise de Mendel de celles des premiers généticiens. Tout comme il nous paraît excessif de considérer que l'hérédité n'était pas un enjeu important chez Darwin. Si la pangenèse n'est pas uniquement une théorie de l'hérédité, son « hypothèse provisoire » l'était en partie. Surtout, ce n'est pas seulement – et même peut-être pas majoritairement – dans le contexte de la pangenèse que Darwin a participé à rendre saillante la question de l'hérédité naturelle pour la théorie biologique, mais plutôt dans la manière dont il a compris l'action cumulative de la sélection naturelle à la lumière du principe d'hérédité (en général), quel que puisse être par ailleurs le détail de son mécanisme (à propos duquel ses idées étaient très confuses et effectivement en flagrante contradiction avec les principes de la théorie cellulaire). Si bien qu'à la question « qui a besoin d'une science de l'hérédité ? » (le titre du chapitre), on pourrait répondre, avec Jean Gayon<sup>5</sup>, que Darwin en avait un besoin impérieux.

Quant à la deuxième partie, la partie la plus centrale de l'ouvrage, nous ne pouvons que redire notre grande admiration pour le travail considérable d'exhumation des sources et de restitution des positions des acteurs, ainsi que des transformations réciproques de celles-ci au fur et à mesure du déroulement de la controverse. Le seul regret que l'on pourrait avoir concerne le chapitre 9 (« An unfinished manuscript ») où il est question du grand livre de Weldon, intitulé *Theory of inheritance*, qu'il laissa inachevé au moment de son décès. En effet, le contenu de ce livre, il nous a semblé, aurait pu être davantage mis à contribution. Le lecteur ne sait finalement pas vraiment quel était son état d'avancement, sa structure, le nombre de chapitres que l'on peut considérer comme achevés, le type d'argumentation produit par Weldon, la nature de l'assise empirique mise en jeu, etc. Au-delà du fait que ce livre aurait conféré une place importante à l'« hérédité ancestrale » (à la Galton) et à l'environnement dans la constitution de ce qu'on était sur le point d'appeler le phénotype, son contenu est, étonnamment, peu mobilisé. Si cet ouvrage a bien la portée que lui prête Radick, il nous semble qu'en tant que pièce maîtresse de son argumentation son contenu aurait dû être rendu plus visible tout au long de ce chapitre.

Étant donné la richesse du livre, on pourrait multiplier les questions qu'il suscite et qui sont autant de signes de l'intérêt qu'il y a à sa lecture. Pour ne pas donner à cette recension une taille déraisonnable, nous en venons maintenant à ce qui constitue la thèse centrale de l'ouvrage, c'est-à-dire la lecture contrefactuelle à laquelle Radick nous invite (qui est par ailleurs très bien résumée dans un *postscriptum* en forme de clin d'œil où l'auteur réécrit la notice biographique de Weldon en faisant décéder celui-ci en 1908 et non en 1906). L'histoire contrefactuelle peut s'entendre à deux niveaux au moins. Dans un sens faible, elle correspond au postulat que les chemins conduisant à la science ont été contingents, mais pas nécessairement le contenu de la

<sup>5</sup> - Jean Gayon, *Darwin et l'après-Darwin : Une histoire de l'hypothèse de sélection naturelle* (Paris : Kimé, 1992).

science lui-même. Ce faisant, elle s'applique au « contexte de découverte », mais pas au « contexte de justification », pour reprendre une distinction fondatrice de la philosophie des sciences. Dans un sens fort, l'histoire contre-factuelle propose que le contenu de la science est dans une certaine mesure contingent, que d'autres sciences, tout aussi performantes que la nôtre, auraient été possibles. Or, et c'est là une des originalités (mais aussi une des difficultés) de ce livre, la thèse de Radick échappe à cette dichotomie. En effet, l'auteur ne remet en question ni le bien-fondé de la génétique chromosomique (celle de Morgan et son école), ni celui de la biologie moléculaire. Cependant, sa démonstration ne porte pas non plus sur la seule question des voies qui ont mené à notre science de l'hérédité. Ce que Radick interroge, comme nous l'indiquions précédemment, c'est l'origine et les raisons de l'omniprésence du déterminisme génétique, dans le discours scientifique et plus encore dans la manière dont le grand public se représente le destin biologique des individus. Selon sa lecture, c'est avec Bateson – et donc contre Weldon – qu'une telle conception des organismes se serait en quelque sorte indurée dans la pensée biologique, qu'elle aurait produit son récit standard où les travaux de Mendel auraient eu valeur de « modèles exemplaires » (au sens kuhnien). Au printemps de l'année 1906, Bateson aurait été bien près de reconnaître sinon sa défaite, du moins l'excès de son mendélisme, et si Weldon était parvenu au terme de son livre une autre science de l'hérédité aurait été envisageable, plus attentive aux effets de l'environnement. Celle-ci aurait relégué les ratios mendéliens au rang de cas particuliers au lieu de les promouvoir comme d'authentiques lois de la nature (les fameuses « lois de Mendel »). Cela n'aurait pas entravé l'essor de la génétique chromosomique, qui aurait d'abord profité de la caractérisation des chromosomes au microscope. Cela n'aurait pas davantage ralenti l'essor de la génétique moléculaire, qui aurait été bien peu redevable du mendélisme de la période classique (1900-1910). En revanche, la victoire de Weldon sur Bateson aurait été une sorte de rempart contre le géno-centrisme essentialiste des discours. Dans la troisième partie du livre, Radick rapporte à ce sujet comment, à l'université de Leeds, un cours alternatif d'inspiration « weldonienne » a permis de former des étudiants plus conscients des interactions gènes-environnement dans la réalisation des caractères phénotypiques, et donc moins enclins à souscrire au discours du tout-génétique.

Pour stimulante qu'elle soit, plusieurs aspects de cette lecture contrefactuelle peuvent prêter à discussion. Nous en retenons trois principalement. Le premier porte sur l'usage qui est fait des normes de réaction dans cette reconstruction. Radick leur confère un rôle considérable : elles seraient la voie privilégiée pour s'extraire d'une compréhension trop rigide-ment déterministe de l'origine des phénotypes. Rappelons qu'une norme de réaction décrit la gamme des phénotypes qu'un génotype peut produire selon les conditions environnementales rencontrées. On peut ici faire une double objection à cette hypothèse de lecture. La première tient à la chronologie : comme l'auteur le rappelle lui-même, le concept de norme de réaction a été presque immédiatement disponible (tout comme celui d'épistasie, d'interaction entre les gènes dans la réalisation du phénotype). Il est ainsi difficile de voir en quoi le caractère effectivement simplificateur des premières élaborations mendéliennes

aurait pu avoir un rôle aussi négatif et durable sur le cours ultérieur de la génétique. N'est-ce pas prêter aux positions batesoniennes une forme d'an-historicité, puisqu'elles se seraient conservées identiques à elles-mêmes au fil d'une histoire qui aura pourtant vu naître la génétique chromosomique, la génétique quantitative, la génétique moléculaire ? Qui plus est, la « victoire » de Bateson, si victoire il y eut, fut en fait ambiguë si on l'a considérée dans une temporalité plus longue : le développement, dans un second temps, de la génétique quantitative correspond en fait à une forme (très réussie) de synthèse entre l'analyse mendélienne de déterminants génétiques discrets et le traitement statistique biométricien de la distribution continue des phénotypes. Dès la fin de la première décennie du  $xx^e$  siècle, cette synthèse était conceptuellement en bonne voie (même si elle fut assez longtemps reléguée en arrière-plan) et ça n'est pas le moindre des mérites de ce livre que de nous rappeler que certains travaux de Pearson lui-même allaient dans ce sens. On ne peut donc s'empêcher de trouver un peu excessif le rôle prêté à cette controverse. Cet épisode fut certes une bataille d'ego (Cambridge contre Oxford), mais la dimension proprement théorique de l'opposition a en fait presque immédiatement donné lieu à des possibilités de conciliation. La seconde objection que l'on pourrait faire à la place donnée dans cette démonstration au concept de norme de réaction est plus directe et plus strictement scientifique. La norme de réaction est par définition une propriété génétique : en cela, il n'est en rien évident qu'elle puisse invalider une compréhension gène-centrée des organismes. Si certes les phénotypes sont sensibles aux variations de l'environnement, ils le sont *en fonction de leur constitution génétique*. Qui plus est, les écarts de sensibilités aux mêmes sollicitations environnementales, soulignées par l'auteur, semblent bien plutôt donner la préséance au déterminisme génétique. Aussi, pour des raisons aussi bien historiques (le concept de norme de réaction a été presque immédiatement accessible et intégré à l'édifice mendélien) que philosophiques (une norme de réaction est une propriété rigoureusement génétique), il ne nous apparaît pas que ce concept puisse jouer le rôle d'antidote au déterminisme génétique que Gregory Radick souhaite lui voir tenir.

Notre deuxième réserve concerne la façon dont le mendélisme de la décennie 1900-1910 (de la redécouverte des lois de Mendel jusqu'aux premiers travaux de Morgan à Columbia) est rattaché aux épisodes postérieurs que sont la génétique chromosomique et la génétique moléculaire. En effet, à plusieurs reprises (p. 325 et 380 notamment), Radick insiste sur l'absence de relation causale entre la phase d'essor du mendélisme et ce qui est advenu après. La méthodologie classique consistant à croiser des individus différant par au moins une paire de caractères n'aurait selon lui joué aucun rôle significatif dans le cours ultérieur de la science. L'auteur en veut pour preuve que les travaux de Beadle et Tatum sur la fonction biochimique des gènes (1941) ou le modèle en double-hélice de la structure de l'ADN de Watson et Crick (1953) n'entretiendraient aucun lien de nécessité avec le mendélisme ainsi compris. Pour Radick, il ne fait aucun doute que « la méthodologie mendélienne par excellence, celle des croisements, était incapable de permettre l'élucidation de la chaîne causale entre l'ADN et les protéines » (380). Il nous semble qu'une telle position est intenable. En effet, si les résultats obtenus par Beadle et Tatum

ou Watson et Crick ne reposent pas *directement* sur des expériences de croisements, ils en découlent néanmoins indirectement : la génétique des champignons et les travaux mettant en jeu l'infection de bactéries par des bactériophages ont été des jalons indispensables dans cette histoire et dans un cas comme dans l'autre il s'agit de l'adaptation des méthodes mendéliennes au cas des organismes haploïdes chez qui la sexualité (c'est-à-dire l'échange de matériel génétique) peut prendre des formes très spécifiques. On pourrait en fait multiplier ce type d'exemples au moment où la microbiologie permettait l'essor de la génétique moléculaire. C'est ainsi une analyse mendélienne tout à fait standard qui a révélé des écarts aux ratios attendus au cours de certains phénomènes sexuels prenant place chez différents types de micro-organismes. Dans certains cas, ces formes d'hérédité génétique non mendélienne (souvent qualifiées à l'époque d'« hérédité cytoplasmique ») n'ont pas conduit à des découvertes majeures (comme pour ce qui est des travaux de Tracy Sonneborn sur les particules kappa chez la paramécie<sup>6</sup>). Mais dans d'autres cas, ces analyses mendéliennes ont participé à la mise en évidence de la génétique mitochondriale (travaux sur la levure) et des protéines prions (travaux sur le champignon *Podospora*). Un autre exemple, peut-être encore plus parlant, est celui des travaux ayant conduit à la compréhension de la manière dont l'information génétique est exprimée pour produire une protéine fonctionnelle<sup>7</sup>. Le modèle dit de l'opéron lactose consiste fondamentalement dans la distinction entre deux classes de gènes : les gènes de structure et les gènes de régulation, les derniers produisant une protéine qui en temps normal inhibe la transcription des premiers<sup>8</sup>. Une telle distinction, ainsi que la caractérisation de la nature négative de la régulation de l'activité des gènes de structure, n'a été possible que par l'obtention de bactéries partiellement diploïdes et hétérozygotes, issues de croisements par « conjugaison », et qui permettaient de comprendre les relations entre les différents gènes<sup>9</sup>. Aussi, contrairement à ce qui est nettement affirmé par l'auteur, l'élucidation de la chaîne causale entre le gène et la protéine, c'est-à-dire les étapes de transcription et de traduction de l'information génétique, a très directement reposé sur le transfert des méthodes mendéliennes au domaine de la microbiologie.

On peut donc opposer à la reconstruction qui nous est proposée un certain nombre d'arguments qui, selon nous, en limitent assez fortement la portée. Mais on peut aussi se placer sur un autre plan, plus général, c'est-à-dire sur le terrain de l'épistémologie. L'auteur le signale très clairement, il a souhaité positionner son enquête à « l'échelle humaine des causes et des raisons » afin de produire une histoire contrefactuelle « intelligible et étayée sur le plan em-

6 - Voir par exemple : Jan Sapp, *Beyond the gene : Cytoplasmic inheritance and the struggle for authority in genetics* (Oxford Univ. Press, 1987).

7 - François Jacob, Jacques Monod, Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins, *Journal of molecular biology*, 3 (1961), 318-356.

8 - Laurent Loison, Michel Morange (dir.), *L'Invention de la régulation génétique : Les Nobel 1965 (Jacob, Lwoff, Monod) et le modèle de l'opéron dans l'histoire de la biologie* (Paris : Éditions Rue d'Ulm, 2017).

9 - Arthur Pardee, François Jacob, Jacques Monod, The genetic control and cytoplasmic expression of « inducibility » in the synthesis of  $\beta$ -galactosidase by *Escherichia coli*, *Journal of molecular biology*, 1 (1960), 165-176.

## Analyses d'ouvrages

pirique» (274). De là son souci du détail et de la description des relations entre Weldon, Pearson et Bateson (entre autres). De là la minutie de la partie centrale du livre, qui, répétons-le, est à ce jour le tableau le plus riche qui ait jamais été proposé des années de controverse. Mais se placer à l'échelle des relations interpersonnelles peut-il conférer à l'histoire contrefactuelle la portée qui est visée ici ? La mort accidentelle et prématurée de Weldon a-t-elle pesé à ce point (mais finalement pas complètement non plus) sur l'histoire de la génétique ? Le mendélisme n'était pas l'affaire du seul Bateson, ni même de son sérail à Cambridge. Il a pris son essor dans différentes traditions nationales, en Allemagne, au Danemark, en Hollande, aux États-Unis, et même en France avec les travaux de Lucien Cuénot. Pour tous ces mendéliens, la mort de Weldon fut en fait un non-événement. Aussi, il n'est pas certain que documenter des trajectoires biographiques puisse jamais suffire à élucider de manière satisfaisante ce qui apparaît plus certainement comme une configuration culturelle d'une certaine extension et robustesse (presque une épistémè au sens de Foucault). Pour le dire rapidement, on peut aisément imaginer une histoire contrefactuelle où la génétique demeure centrale tout au long du xx<sup>e</sup> siècle quand bien même Bateson ne serait jamais revenu de son expédition de jeunesse en Asie centrale. Symétriquement – mais l'exercice est bien plus périlleux – pourrait-on concevoir l'émergence d'une science de l'hérédité qui n'ait pas été prioritairement fondée sur l'analyse de la combinatoire de caractères rendus artificiellement discrets ? La chose n'est pas impensable, mais une telle expérience de pensée ne pourrait être tentée que sur le terrain des concepts plutôt que sur celui des biographies. Il y a en fait, parcourant l'entièreté du livre, quelque chose comme une inadéquation entre l'ordre des causes (la mort de Weldon au moment où il aurait pu « gagner » sa controverse avec Bateson) et celui des effets (le géno-centrisme de la biologie). Bateson fut-il à ce point nécessaire dans la marque qu'il aurait imprimé à la biologie et à son discours ? Tout bien pesé, il nous semble que non.

Laurent LOISON

Sébastien RICHARD, *Histoire philosophique de la physique* (Paris : Vrin, 2022), 14 × 20 cm, 588 p., bibliogr., index.

Avec cet ouvrage, Sébastien Richard se propose de présenter aux lecteurs et lectrices une « mise en ordre cohérente et éclairante du passé<sup>1</sup> » au travers d'un prisme d'ordre ontologique et épistémologique. L'*Histoire philosophique de la physique* traite ainsi des évolutions conceptuelles et méthodologiques successives ayant traversé l'histoire de la physique, et ce, de la philosophie naturelle héritée de l'Antiquité à l'avènement de la mécanique quantique au début du xx<sup>e</sup> siècle. Dans cette perspective de synthèse, S. Richard a consciemment laissé de côté les considérations d'ordre sociologique, politique, économique ou encore géographique afin d'éviter de s'éloigner du cœur de cet ouvrage, à savoir, l'évolution de la notion de physique. Ce choix semble à notre

1 - Ian Hacking, « Styles pour historiens et philosophes », trad. V. Guillin dans J.-F. Braunstein (éd.), *L'histoire des sciences : Méthodes, styles et controverses* (Paris : Vrin, 2008), 288.

égard tout à fait justifié et judicieux étant donné l'envergure associée à une telle histoire. Afin d'amener le lecteur à se repérer dans les méandres souvent sinueux de l'histoire de la physique, Richard distingue essentiellement trois grandes périodes associées chacune à une conception propre de la nature. On retrouve ainsi la physique antique, la physique classique et la physique moderne. Cette tripartition bien que simpliste d'un point de vue historique est guidée et justifiée par une conception commune et sous-jacente de la nature propre à chacune de ces périodes. Il ne s'agit pas de nier les hétérogénéités de pratiques et de courants de pensée présents à chacune de ces trois époques mais plutôt de mettre l'accent sur une dimension philosophique commune.

Du point de vue de la structure, l'ouvrage se découpe en dix chapitres, les deux premiers étant centrés respectivement sur la physique antique et les débuts de la physique classique. Les chapitres trois à sept représentent le cœur de cet ouvrage et parcourent la mécanique classique de Descartes à Hamilton ainsi que les développements de la physique en thermodynamique et en électromagnétisme. Les trois derniers chapitres sont quant à eux réservés à la physique moderne et concerne la relativité restreinte et générale ainsi que la mécanique quantique. Ce tour d'horizon, bien que conséquent, est bien construit et l'enchaînement des chapitres se fait de manière cohérente. Il est toutefois important de noter que l'auteur a pris le parti dans cet ouvrage de ne pas faire l'impasse sur les mathématiques tout en essayant de se limiter au maximum. Cet aspect revêt, pour reprendre ses mots, un caractère « essentiel » qu'il est nécessaire de prendre en compte tant il est indissociable de la physique. L'évolution de ce récit requiert alors de trouver un équilibre harmonieux entre les différentes composantes historiques, physiques, mathématiques et philosophiques afin de ne pas s'écarter du propos. Bien que parfois sinueuse et faite de détours et d'allers retours, l'histoire présentée par S. Richard parvient dans l'ensemble à conserver cet équilibre. Cela étant, certains développements mathématiques auraient pu être réduits sans entacher les discussions philosophiques et conceptuelles (nous pensons notamment aux équations différentielles ainsi qu'à la mécanique lagrangienne et hamiltonienne).

La thèse principale défendue dans cet ouvrage est que la physique classique représente une réelle rupture par rapport à la physique de l'Antiquité. Ce sont à la fois la manière dont la nature est pensée et appréhendée ainsi que les méthodes et pratiques utilisées pour sonder cette dernière qui sont radicalement transformées. À l'inverse, l'avènement de la physique moderne ne serait, elle, pas construite en opposition à la physique classique mais plutôt issue d'unifications successives se plaçant dans une certaine continuité. La mathématisation de la physique ainsi que le développement de la pratique expérimentale sont deux exemples d'une méthodologie déjà présente dans la physique classique pour lesquels une forme de continuité semble prévaloir. Ce passage à la physique moderne a tout de même donné lieu à une rupture conceptuelle ayant profondément changé les notions de temps, d'espace, de causalité, etc. Afin de soutenir cette thèse, S. Richard fait appel à quatre thèmes principaux que sont la mathématisation, l'expérimentation, la fiction (essentiellement associée aux expériences de pensée) et l'unification. Ceux-ci parcourent tout l'ouvrage et sont les points autour desquels les réflexions d'ordre ontologique

## Analyses d'ouvrages

et épistémologique ont lieu. La mathématisation ainsi que l'unification sont en particulier les deux thèmes utilisés pour justifier une forme de continuité entre physique classique et physique moderne. Il est intéressant de noter que cette thèse de continuité entre en opposition avec la vision héritée de Thomas Kuhn sur l'incommensurabilité des théories scientifiques. Bien que l'auteur mentionne à plusieurs reprises les travaux de Kuhn au sujet du développement de la physique classique, il ne s'attarde que peu sur la contradiction entre incommensurabilité et continuité du point de vue de sa thèse. Cette discussion aurait mérité d'être plus approfondie en faisant appel à d'autres éléments que la mathématisation comme c'est le cas dans cet ouvrage. Outre cela, les thèmes choisis sont, selon nous, tout à fait pertinents et permettent de mettre en avant certains aspects de la nature de la physique. Certaines autres vertus épistémiques telles que la simplicité, la fécondité ou encore la consistance d'une théorie auraient pu, elles aussi, être explicitées. Il s'agit ici d'une réserve mineure étant donné que S. Richard parvient à articuler et développer ces quatre thèmes de manière fluide et éclairante tout au long des chapitres.

Pour conclure, S. Richard parvient à dégager et éclaircir une partie du chemin philosophique et conceptuel emprunté par des générations de scientifiques, afin d'en arriver à l'édifice actuel de la science contemporaine reposant sur les deux piliers que sont la relativité générale d'un côté et la mécanique quantique de l'autre. Bien que dense et détaillé, ce chemin ne représente qu'une facette d'une histoire qu'il serait intéressant d'englober dans un contexte plus général.

Charly MOBERS

Sabine ROMMEVAUX-TANI (ed.), *De sex inconvenientibus: Traité anonyme de philosophie naturelle du XIV<sup>e</sup> siècle* (Paris: Vrin, 2022), 15.8 × 23.8 cm, 385 pp., bibliogr., 3 index, table, series "Textes philosophiques du Moyen Âge."

The history of late medieval science is a particularly demanding field that necessitates a delicate balance of philosophical, scientific, and humanistic skills. All of these components must be present and well-aligned to produce a meaningful work. However, this is by no means an easy or straightforward task. The philosophy of the fourteenth century is itself exceedingly intricate, and the scientific ideas (if one were to methodologically separate them from the more philosophical ones) are highly specific to that era and foreign to ours. Additionally, as these texts are primarily conveyed in a manner that is often difficult to access, only the guidance of a solid understanding of paleography and philology can help navigate through the challenging terrain of late medieval abbreviations, corrupted texts, or dubious readings. All of these obstacles are present in the treatise *De sex inconvenientibus* (DSI) and, as it is a pleasure to notice, they have been addressed at the highest level of quality in the present book.

DSI is a complex text that, in a certain way, summarizes the work previously undertaken by others, yet it presents its materials in a unique and distinct-

tive manner. Even the title, as attested in the manuscript tradition, is unusual: “Treatise on (the) six difficulties.” What precisely are these difficulties? Why do they warrant treatment over others? And, above all, what systematic framework underlies them – is it a thematic approach (such as the “concept” of motion), a specific scientific discipline (physics, mathematics, logic), or a polemical stance aligning with one school against another? We could pose additional similar questions, some of which may remain open-ended or only partially and tentatively answered.

In general, it is evident that DSI can be situated within a lineage of texts representing what we now term the “calculatores tradition” – a tradition of thought that, a century ago, was credited with making significant strides toward the modern science of nature, but today is often viewed as a quantified rendition of Aristotelian physics itself. The difficulties or “inconveniences” themselves (which I will address shortly below) are clearly stated, but the text offers no explicit rationale for their significance. Nor does it provide hints of a systematic conceptual approach; the questions do not coalesce into a coherent “system,” either notionally or axiomatically.

Indeed, one of the most notable and intriguing aspects of DSI is its disciplinary multiplicity. While ostensibly about “physics,” its conception of the subject extends far beyond the bounds of a typical text on physics from the period. DSI engages with its topics through mathematics (primarily proportions) and employs various logical tools. Simultaneously, it delves into discussions on the propagation and effects of light (q. 1, art. 3; q. 2., art. 2), thereby establishing thematic connections from optics to astronomy and astrology. Like other similar texts, it offers numerous instances of physical “thought experiments,” yet perhaps uniquely, it includes a detailed examination of magnetism within an article concerning qualitative motion (q. 2, art. 1). The discussion of *reactio* (q. 2, art. 3) may have particularly piqued the interest of students and masters of the medical faculty (as evidenced by its decisive role in the Italian reception of Swineshead’s *Liber calculationum*). Furthermore, DSI seems to have emerged within a specific academic context in which the traditional strict division of the sciences was being questioned.

The author of the text remains completely unknown; no attribution whatsoever can be found in the manuscript copies or the printed edition. While the text offers no direct clues for identifying the author, some intriguing indications about the context could be gathered. Rommevaux-Tani suggests that DSI was likely written between 1335 and 1339, a hypothesis supported by the analysis of mentioned and potentially used but unacknowledged sources, as well. This dating aligns with a period of direct contact with the first circle of calculators at Oxford, including figures such as Thomas Bradwardine, William Heytesbury, the enigmatic Adam of Pipewell, and likely Richard Kilvington (though not explicitly mentioned in DSI).

This is coherent with the fact that DSI characterizes a particular position regarding the speed of the generation of form as usual for the *tota schola oxoniensis* (p. 147, line 4-5). However, it does not necessarily indicate that the author was a member of this school; rather, it could suggest a thorough fa-



## Analyses d'ouvrages

miliarity with it from an outsider's perspective. In any case, the copyist of the important Prague manuscript added to the explicit that these questions have been disputed in Paris (*questiones de motu parisiis disputate*). Rommevaux-Tani suggests that the structure and argumentative style of DSI imply that it might have been a disputational exercise rather than the work of a seasoned master eager to develop their own theory. It seems that DSI could be the result of an exercise proposed by a master for his students, "consisting of producing series of six arguments against the theses usually defended at the university" (p. 13). I consider this remark to be historically important; as a matter of fact, I think this is a brilliant hint for understanding DSI which settles the text into the broader framework of the Paris university.

Determining the full scope and influence of this treatise remains challenging, though it is a task that can now be undertaken more effectively with the availability of a good edition. The treatise is found in seven manuscripts, some of which contain other texts representative of the calculators' tradition, and it was printed by Bonetus Locatellus in Venice in 1505 alongside other emblematic texts such as Bradwardine's *De proportionibus*, *Questio de velocitate* by Giovanne da Casale and *De latitudinibus formarum* (here, as usual, wrongly attributed to Nicole Oresme). Additionally, DSI is known to have been referenced by John Dumbleton in his *Summa* and utilized by Nicolas d'Autrecourt – an important fact for dating the text, as Rommevaux-Tani notes that the Paris lat. 6559 manuscript bears a possession mark from Nicolas d'Autrecourt himself. Pierre Ceffons also employed DSI in his "Questions on Lombard's Sentences" to discuss the generation of the first qualities from heavenly bodies through the action of light.

As Rommevaux-Tani points out DSI is not merely a *reportatio* but a well-composed text. Indeed, the author outlines his approach at the beginning, indicating a methodical treatment of the proposed questions by integrating various positions and difficulties related to them (p. 135). However, it is essential to clarify the general subject matter of the treatise. While it deals with motion (*de motu* says the Prague scribe), it does not engage with the main theories concerning the nature and definition of motion, such as whether it is a *fluxus formae* or a *forma fluens*, or if motion should be conceptualized as an in-itself-existing *successivum* or solely in reference to permanent entities like the body in motion and its location. Instead, the emphasis is on the quantitative aspects of motion, aligning with the broader themes and methods of the *schola oxoniensis* and the calculators' tradition in a broader sense.

Thus, approaching the topic of "motion" comprehensively, DSI comprises four principal questions dedicated to the four categories within which change or *mutatio* could theoretically occur. While Heytesbury had previously discussed motions according to quality, quantity, and place in his *De tribus predicamentis*, DSI extends this framework by considering change according to substance – namely, generation and corruption (which usually were not conceptualized as motion *strictu sensu* due to its occurrence instantaneously between contradictory terms). I think that the general division of the text marks DSI as an early manifestation of Heytesbury's influence beyond Oxford.

The first question (pp. 135-201) examines whether a certain speed can be attributed to the generation of forms. The second question (203-257) discusses establishing the starting point for a quantitative consideration of alteration or qualitative motion, debating whether to prioritize “slowness” or “quickness.” The third question (259-296) is perhaps the most unusual of all, at least in its formulation: *Utrum augmentum continuum in augendo velocitet motum suum*. Rommevaux-Tani renders this question as follows: *Est-ce qu’un continu augmenté rend son mouvement rapide en augmentant ?* I believe it is worth reflecting on whether the notion of acceleration (Oresme will later use *velocitatio* for it) is involved here. In any case, there is once again a direct connection to Heytesbury, as Rommevaux-Tani points out (p. 259, n. 1). All three articles are dedicated to problems related with “rarefaction” and “condensation,” a key problem that is frequently addressed in other calculator’s texts. The fourth and last question is about local motion (297-364).

The four questions themselves represent only the first – but not necessarily a “didactical” – approach to the treatment of the motion (or mutation) according to one of the four categories. For, to all four questions, three extensive articles are added within which even more specific problems are discussed. For instance, in the question on local motion, the first article deals with the substantial problem regarding the cause of the acceleration of falling bodies. The second article asks whether the speed of a sphere is to be considered according to a point or according to space. The third article discusses the famous middle degree “theorem,” which has been the subject of various discussions in the history of science until Galileo. But why “about the six difficulties?” This designation arises from the structured exercise underlying DSI: for each of the four main questions, the author presents three opinions, followed by six difficulties or *inconvenientia* to be addressed (except for the last question, which presents three sets of six difficulties!).

In addition, this book provides detailed presentations of the main problems related to the text’s content (pp. 12-109) and an excellent analysis of the manuscript tradition (110-132), allowing for the postulation of a stemma showing the dependence between the conveyed copies. The edition adopts the above-mentioned Paris manuscript as its base and, after its careful evaluation, it excludes the printed edition from the critical apparatus. As the text itself does not include any figures, Rommevaux-Tani has reproduced them in the appendix.

This book represents a major contribution to our field of research. DSI is a highly technical treatise that demands careful attention from readers. With the aid of the comprehensive explanations provided in the introduction, readers can appreciate the subtlety with which fourteenth-century masters discussed matters related to motion. As one of the few critically edited texts in its field, DSI promises to significantly enhance our understanding of the calculatores tradition.

Daniel A. Di Liscia

## NORMES DE PRÉSENTATION DES ARTICLES SOUMIS À LA REVUE POUR PUBLICATION

Envoyer l'article à la rédaction sous la forme d'un fichier, accompagné d'une version pdf anonymisée, à l'adresse électronique : [Revue.d.histoire.des.sciences@ens.fr](mailto:Revue.d.histoire.des.sciences@ens.fr). L'article doit être accompagné d'un résumé en français suivi de mots-clés et de la traduction du résumé et des mots-clés en anglais. Ne pourront être soumis à la procédure d'expertise en double aveugle que des articles proposés pour publication à la *Revue d'histoire des sciences* qui ont été soigneusement rédigés, relus et présentés.

Longueur maximum : 70 000 signes, espaces et notes incluses. Saisir le texte en Times New Roman, corps 12, interligne 1,5. Indiquer vos nom, prénom, adresse professionnelle complète (ou privée pour les retraités) et adresse électronique sur une page initiale ne comportant que cela. Expliciter toutes les abréviations lors de leur première mention ou dans une liste placée en début d'article. Indiquer les prénoms entiers de toutes les personnes citées (savants, historiens, chercheurs...), lors de leur première mention. Ensuite on pourra les désigner par leur seul nom de famille. Indiquer, entre parenthèses, les dates de naissance et de décès de ces personnes chaque fois que cela est pertinent.

### NOTES

Les créer et numéroter à l'aide de la fonction «insertion automatique» de son traitement de texte et les placer en bas de page. Longueur maximum de l'ensemble des notes : de l'ordre du quart de l'article. Forme de l'appel de note :

- dans la «zone titre» : \*, \*\*, \*\*\*, etc.
- dans la suite de l'article : chiffre arabe en exposant (exemple : cet article <sup>4</sup>...); devant la note elle-même, chiffre arabe suivi d'un tiret (exemple : 4 - Article publié dans...). Numérotation en continu, à partir de 1, jusqu'à la fin de l'article.

Chaque note doit se rapporter à un endroit précis du texte : la *Revue* n'accepte pas les notes concernant tout un paragraphe ou un ensemble de paragraphes.

### CITATIONS

Elles seront placées entre guillemets mais composées en italique seulement si la langue diffère de celle du texte courant de l'article. Indiquer en note la référence bibliographique complète (avec mention de la page) de la source. S'il s'agit d'une traduction du texte original, le préciser et indiquer la langue d'origine et la source (auteur de l'article ou référence bibliographique précise de la traduction – de référence, de préférence – citée). Fournir le texte original en note éventuellement.

### FIGURES

Ne pouvant être imprimées en quadrichromie, les figures et illustrations doivent nous être fournies en noir et blanc. Elles nous seront envoyées dans un format image (pdf, jpeg, tiff, etc.) en haute définition. Dans le corps du texte, indiquer entre parenthèses ou crochets les endroits où celles-ci doivent être insérées. Transmettre les figures et illustrations ainsi que leurs légendes dans des fichiers distincts de celui contenant le texte de l'article.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Elles doivent obligatoirement être placées en notes. Elles doivent être complètes et exactes. Indiquer les prénoms des auteurs en entier. En règle générale, on n'utilisera pas l'abréviation «p.» pour «page» (écrire «16-32» pour «pages 16 à 32») sauf quand son absence pourrait être source de confusion comme dans certaines références complexes (cf. *infra*).

#### Ouvrages

Mirko D. Grmek, *Le Legs de Claude Bernard* (Paris : Fayard, 1997). (*Les mentions du lieu d'édition, de l'éditeur et de l'année de parution sont obligatoires, sauf pour les ouvrages antérieurs au xx<sup>e</sup> siècle, pour lesquels on pourra se dispenser de celle de l'éditeur uniquement.*)

#### Articles

Pascal Descamps, La découverte de Neptune : Entre triomphe et camouflet, *Revue d'histoire des sciences*, 68/1 (2015), 47-79. (*Pour : tome 68, n° 1, année 2015, pages 47-79; pas de guillemets au titre de l'article.*)

#### Contribution à un ouvrage collectif

Enrico Giusti, Images du continu, in *The Leibniz-Renaissance : International Workshop*, Firenze, 2-5 giugno 1986 (Florence : Olschki, 1989), 83-97.

#### Thèses inédites et manuscrits

Seguin Aîné, « Mémoire du pont de Tournon-Tain », ms. du 30 novembre 1822 (Arch. dép. de l'Ar-dèche, fonds Seguin, pièce 27).

Javier Echeverria, « La Caractéristique géométrique de Leibniz en 1679 », thèse de doctorat d'État (univ. Paris I, 1980).

#### Références bibliographiques complexes

Utiliser systématiquement les abréviations conventionnelles : sér. (série), t. (tome), vol. (volume), fasc. (fascicule), chap. (chapitre), p. (page), etc.

Leonhard Euler, *Leonhardi Euleri opera omnia* (Bâle-Boston-Stuttgart : Birkhäuser), sér. 2, vol. 24, part. II (1987), p. 37

#### Correspondance, manuscrits, périodiques, livres sont à adresser à la rédaction :

Revue d'histoire des sciences – CAPHÉS (UAR 3610, CNRS – ENS-PSL) – 45, rue d'Ulm – 75005 Paris – France. Tél. : +33(0)1 44 32 26 59. Courriel : [Revue.d.histoire.des.sciences@ens.fr](mailto:Revue.d.histoire.des.sciences@ens.fr)

#### Les articles soumis à la Revue pour publication devront être présentés conformément aux normes décrites *supra*.

Tout article proposé pour publication à la *Revue d'histoire des sciences* est soumis à une procédure d'expertise en double aveugle. Après examen par le comité de rédaction, les auteurs recevront une réponse dans un délai de trois mois environ après réception du manuscrit. L'accord de publication pourra être assorti d'une demande de modifications sur le fond, la forme ou la présentation. Les articles acceptés seront publiés dans un délai variable selon les possibilités de la Revue. Les auteurs recevront un exemplaire papier du numéro de la revue et le tiré à part électronique de leur contribution.

#### LA REVUE D'HISTOIRE DES SCIENCES ET LES ARCHIVES OUVERTES

L'auteur peut à tout moment déposer dans des archives ouvertes institutionnelles la version *pre-print* de sa contribution, à savoir la version du manuscrit avant son évaluation éditoriale. La version *postprint* de la contribution peut, quant à elle, y être archivée à l'issue d'une période de douze mois après la publication par la maison d'édition de la version PDF de l'article. La reproduction de l'article par fichier PDF de la maison d'édition dans des archives ouvertes est interdite. Les auteurs conservent le droit de reproduire ou de représenter cette version *postprint* dans le cadre de leurs activités, non commerciales, de recherche et/ou d'enseignement. Ils peuvent communiquer cette version lors de colloques, congrès et journées de formation auxquels ils participent. En cas de publication, ils doivent se rapprocher de l'éditeur pour obtenir son accord.

#### Tarifs d'abonnement 2024 TTC (offre valable jusqu'au 31 décembre 2024)

	France	Étranger (hors UE)
Particuliers	<input type="checkbox"/> 75 EUR	<input type="checkbox"/> 90 EUR
Institutions	<input type="checkbox"/> 140 EUR	<input type="checkbox"/> 180 EUR
Adhérents / Étudiants (sur justificatif)	<input type="checkbox"/> 55 EUR	<input type="checkbox"/> 55 EUR

Chaque abonnement donne droit à la livraison des 2 numéros annuels de la revue et à l'accès en ligne aux articles en texte intégral aux conditions prévues par l'accord de licence disponible sur le site [www.revue.armand-colin.com](http://www.revue.armand-colin.com).

Prix au fascicule : 45 EUR

#### Abonnement et vente au numéro de la *Revue d'histoire des sciences*

Dunond Éditeur, Revues Armand Colin – 11, rue Paul Bert – CS 30024 – 92247 Malakoff cedex

Tél. (indigo) : 0 820 800 500 – Étranger : +33 (0)1 41 23 60 00 – Fax : +33 (0)1 41 23 67 35

Mail : [revues@armand-colin.com](mailto:revues@armand-colin.com)

#### Vente aux libraires

U. P. Diffusion / D. G. Sc. H. – 11, rue Paul Bert – CS 30024 – 92247 Malakoff cedex – Tél. 01 41 23 67 18 – Fax : 01 41 23 67 30