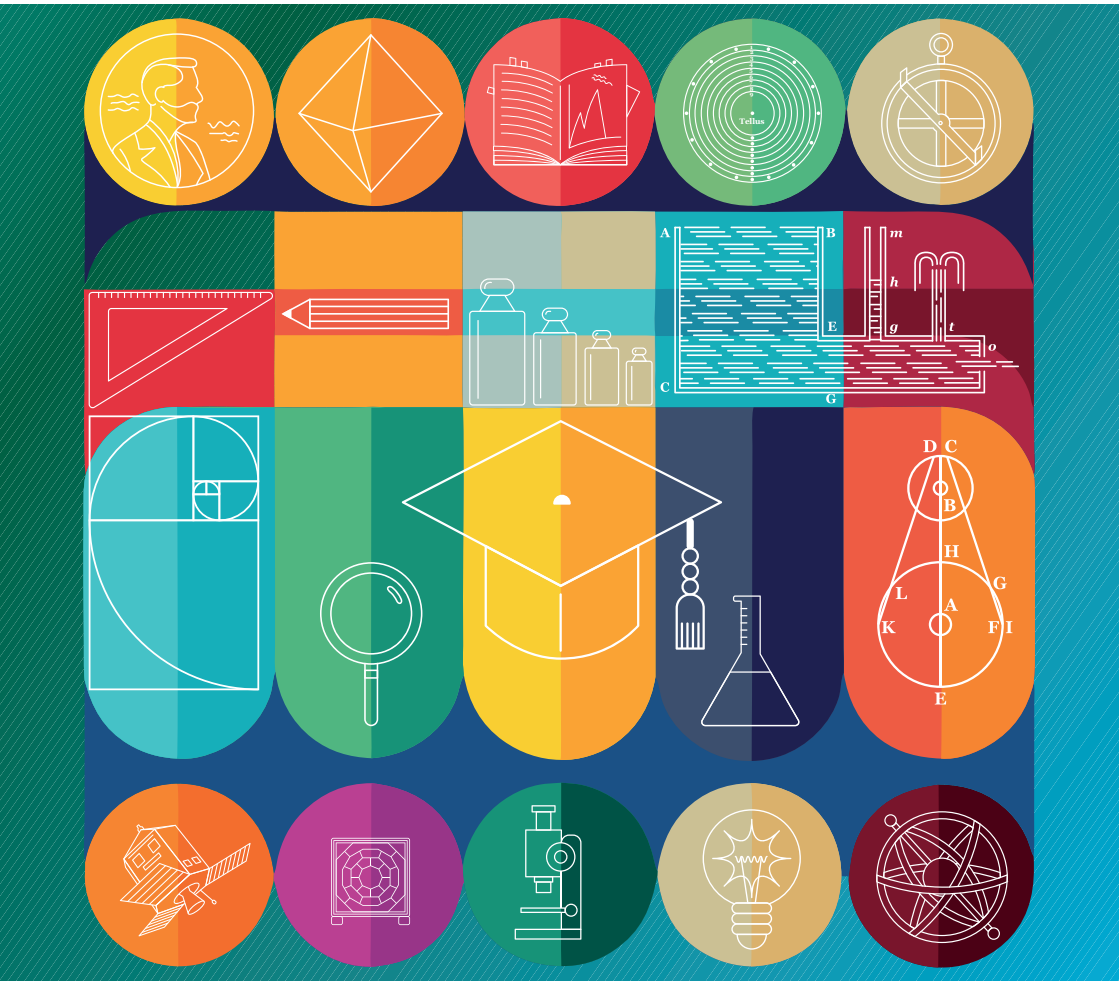
msh PARIS-SACLAY

ACTES

APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

VERS UNE INTERDISCIPLINARITÉ

DIDACTIQUE – HISTOIRE DES SCIENCES – ÉPISTÉMOLOGIE



DIRECTION
Laurence Maurines
Christian Bracco

JOURNÉE D'ÉTUDE
3 juin 2021
MSH Paris-Saclay

msh PARIS-SACLAY
ACTES
13

APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

Vers une interdisciplinarité didactique – histoire des sciences – épistémologie

JOURNÉE D'ÉTUDE
3 juin 2021
MSH Paris-Saclay

DIRECTION
Laurence Maurines
Christian Bracco

MSH PARIS-SACLAY
ÉDITIONS

MSH Paris-Saclay Éditions, Université Paris-Saclay, 2024.

4, avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette
www.msh-paris-saclay.fr

Collection « Actes »
ISSN 2800-7891

Cet ouvrage est publié en accès ouvert selon les termes de la licence Creative Commons Attribution – Utilisation non commerciale – Pas d'œuvre dérivée 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0), qui permet le partage de l'œuvre originale (copie, distribution, communication) par tous moyens et sous tous formats, sauf à des fins commerciales, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée et diffusée sans modification, dans son intégralité.
Pour plus d'informations : https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

ISBN 978-2-9590898-2-4

MSH Paris-Saclay Éditions
Actes 13

Apprendre et penser les sciences dans l'enseignement et la formation scientifique

Vers une interdisciplinarité didactique – histoire des sciences – épistémologie

Journée d'étude
(MSH Paris-Saclay, 3 juin 2021)

Sous la direction de
Laurence Maurines & Christian Bracco

SOMMAIRE

Laurence Maurines & Christian Bracco
Introduction. L'épistémologie et l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences : un champ de recherche interdisciplinaire à développer 7

Pierre Savaton
L'histoire des sciences dans l'enseignement et la formation scientifique. Une longue histoire 27

Cécile de Hosson
Recherche en didactique et histoire des sciences. Des origines aux développements actuels 61

Laurence Maurines
Introduire l'histoire des sciences en classe pour travailler les représentations de la/des science(s).La transition géo-héliocentrique selon une approche anthropologique des pratiques scientifiques 85

Christian Bracco
Éloge d'une « physique de l'éphémère ». Introduction aux mouvements planétaires et à la relativité restreinte à partir d'une démarche historique mettant en valeur des phases de transitions dans l'élaboration des connaissances 125

Clément Crastes
Enseigner la mécanique des fluides au lycée et en début de licence en s'appuyant sur l'histoire des sciences. Propositions didactiques 155

Antonietta Demuro
Quelques exemples d'interaction entre théorie et empirie dans l'étude statistique de la turbulence (1920-1940). Quel intérêt pour la formation et l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui ? 187

Manuel Bächtold
Postface. Pourquoi et comment introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique ? Une tentative de mise en perspective des contributions de l'ouvrage 209

Auteur·es 227

Introduction

L'épistémologie et l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences : un champ de recherche interdisciplinaire à développer

Laurence Maurines & Christian Bracco

Depuis une quarantaine d'années environ, les questions liées à l'apport de l'épistémologie et de l'histoire des sciences (HS) à l'enseignement et à la formation scientifique sont à l'origine du développement d'un champ de recherches en éducation se situant au carrefour de la didactique et de l'HS, de la philosophie et de la sociologie des sciences[1]. Ce champ est parcouru par des questions toujours d'actualité, en particulier en France où les travaux sont encore peu nombreux. Les recherches questionnent, entre autres, les visées de l'introduction de l'HS en classe, ainsi que les modalités de cette introduction. Les travaux ancrés dans le champ de recherches en éducation désigné par l'acronyme *NoS* (*Nature of Science*) et centré sur la dimension épistémologique[2] de l'enseignement-apprentissage des sciences (Lederman, 2007 ; Erduran & Dagher, 2014) examinent

---

1 Ces questions sont explorées dans la revue *Science & Education* fondée en 1992 par l'australien Michael Matthews (2003). Initiateur majeur de ce champ de recherche, il est également à l'origine de l'International History, Philosophy, and Science Teaching Group. Pour plus d'informations sur ce dernier, voir en ligne : https://ihpst.clubexpress.com/ (consulté le 19/04/2024).

2 Nous accordons au mot « épistémologie » le sens de méta-discipline qui étudie la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration en mobilisant toutes les approches d'études des sciences (philosophie, histoire, sociologie, psychologie, etc.).

l'image de la/des science(s)[3] renvoyée par les programmes et manuels d'enseignement, ainsi que par les pratiques enseignantes. Ils montrent que les représentations des élèves, étudiants et enseignants sur ce qu'est/sont la/les science(s) correspondent davantage à une image empirico-inductive et réaliste « naïve » des sciences qu'à une vision informée où « la connaissance est construite de façon active par un individu pensant seul ou au travers d'échanges. Elle n'est pas reçue ou transmise passivement de l'environnement […]. Elle ne vise pas la découverte d'une réalité objective et certaine (ou vraie) existant indépendamment du monde éprouvé par l'individu et social » (Deng *et al.*, 2011 : 964 ; notre traduction)[4]. Ces travaux étudient l'impact de dispositifs innovants visant à faire évoluer ces représentations, en particulier grâce à l'introduction de l'HS. Le champ de la *NoS* est parcouru par de nombreux débats, dont celui de la caractérisation de la/des science(s) à des fins d'enseignement et des stratégies à mettre en œuvre en classe. Les études sur les sciences auxquelles se réfèrent les chercheurs relèvent d'approches et courants divers en partie liés aux objectifs éducatifs et de recherche poursuivis.

Les réformes récentes de l'enseignement des sciences dans le cycle terminal de lycée[5] et dans la formation des enseignants du secondaire en France constituaient autant d'opportunités pour impulser une dynamique de recherches sur l'introduction de l'épistémologie et de l'HS dans l'enseignement et la formation scientifique. La mise en place de nouveaux cursus en licence et de nouvelles structures, notamment à

---

3 Selon Soler (2009 : 16 et 18), « Parler de la science au singulier, c'est se référer à l'idée générale de scientificité […]. Mentionner les sciences au pluriel c'est sous-entendre l'existence d'une multitude de disciplines qui d'un côté diffèrent, de l'autre sont semblables en ce qu'elles sont des instanciations particulières de l'idée de science ».

4 *« knowledge is actively constructed within a thinking person individually or through social exchanges. It is not passively received or transmitted from the environment […]. Knowing is not targeted toward the discovery of an objective and certain reality (or truth) that may exist independently from the individual's experiential or social world ».*

5 Une visée d'apprentissage épistémologique est explicitée dans les programmes actuels d'enseignement de sciences de première et terminale, sans pour autant être opérationnalisée au travers de la mention d'objectifs précis à atteindre, de thèmes historico-scientifiques à travailler et de méthodes pédagogiques à mettre en œuvre.

l'université Paris-Saclay (École universitaire du premier cycle), en constituaient d'autres.

La journée d'étude que nous avons organisée le 3 juin 2021 sous l'égide de la Maison des sciences de l'Homme (MSH) Paris-Saclay, « Apprendre et penser les sciences dans l'enseignement scientifique : vers une interdisciplinarité didactique-HS-épistémologie. Exemples, ouvertures et implications », visait à soutenir le développement de travaux sur l'introduction de l'HS dans l'enseignement et la formation scientifique. Nous souhaitions également rapprocher différentes communautés, didacticiens et historiens en particulier, pour examiner comment elles peuvent conjointement contribuer à créer des dispositifs d'enseignement et de formation originaux susceptibles d'être diffusés, car expérimentés et validés sur le plan de la recherche. Enfin, étant donné que les recherches sur les enseignants pointent leurs besoins et demandes de ressources (Höttecke et Silva, 2011 ; Beaufils, Maurines & Chapuis, 2010), nous désirions présenter quelques pistes et propositions susceptibles d'être reprises par les formateurs d'enseignants et par les enseignants de sciences eux-mêmes.

La question des apports potentiels de l'histoire et de la philosophie des sciences à la définition d'un enseignement de sciences, placée au centre de ce volume, est très vaste. Elle peut être examinée selon deux grandes perspectives.

La première relève d'un questionnement sur l'arrière-plan épistémologique qui sous-tend la définition de tout contenu d'enseignement. Il s'agit d'expliciter la référence retenue et la façon dont elle est transposée en classe.

La seconde relève d'un questionnement sur l'introduction même d'éléments historiques et épistémologiques dans l'enseignement des sciences. Il conduit à quatre grandes catégories de questions : pourquoi introduire l'épistémologie et l'HS ? Comment les introduire ? Quelles sont les conditions pour que cette introduction permette d'atteindre les objectifs visés ? Quels éléments introduire ?

En ce qui concerne la première perspective, dans la mesure où l'enseignement des sciences ne vise pas uniquement l'apprentissage de savoirs, mais plus largement l'apprentissage de démarches et d'attitudes, la référence est à penser en termes de pratiques. En reprenant l'expression

introduite par Jean-Louis Martinand (1986), il s'agit de préciser la/les pratique(s) sociale(s) de référence, c'est-à-dire « les activités objectives de transformation d'un donné naturel ou humain » qui « concernent l'ensemble d'un secteur social et non des rôles individuels » et dont « la relation avec les activités didactiques n'est pas d'identité » (Martinand, 1986 : 137), mais relève d'une relation de comparaison. C'est en adoptant une telle approche comparative et en se référant aux travaux de Karin Knorr Cetina (1999) sur les pratiques épistémiques de communautés scientifiques que Richard A. Duschl et Richard Grandy (2012) défendent leur proposition curriculaire de mettre au cœur de l'enseignement la modélisation et l'argumentation. C'est, de plus, en concevant l'apprentissage scientifique comme entrée et appropriation d'une culture qu'ils appellent à « faire faire des sciences » aux élèves. Plus récemment, Per Kind et Jonathan Osborne (2017) rappellent que le but de l'enseignement scientifique est avant tout d'initier aux grandes manières de raisonner en sciences. En mobilisant les travaux de Ian Hacking inspirés par l'historien Alistair Crombie, les auteurs en identifient six : *Mathematical Deduction*, *Experimental Evaluation*, *Hypothetical Modeling*, *Categorization and Classification*, *Probabilistic Reasoning*, *Historical-Based Evolutionary Reasoning*[6].

En ce qui concerne la seconde perspective, les raisons évoquées pour l'introduction d'éléments d'HS dans l'enseignement des sciences sont nombreuses et peuvent être interdépendantes. Elle vise par exemple à aider l'apprentissage de concepts scientifiques (Monk & Osborne, 1997 ; Rudge & Howe, 2009 ; Décamp & Hosson, 2012), à soutenir le développement de compétences argumentatives et la pensée critique (Allchin, 2011), à intéresser et (re)motiver les élèves pour les études et métiers scientifiques (Solbes & Travers, 2003), à travailler les représentations de la/des science(s) des élèves (Matthews, 2003 ; Adúriz-Bravo, 2010 ; Maurines & Beaufils, 2011, 2013).

---

[6] Ian Hacking (1992 : 11) désigne ces modes de pensée par « styles de raisonnement scientifique ». Chaque style introduit beaucoup de nouveauté au travers de *« new types of objects, evidence, sentences (new ways of being a candidate for truth or falsehood), laws (or at any rates modalities), possibilities ».*

Cette introduction peut être envisagée dans un cadre disciplinaire ou multidisciplinaire/interdisciplinaire. Dans le premier cas, elle est pensée comme pouvant contribuer à l'apprentissage de nouveaux concepts scientifiques ou viser un autre type d'apprentissage, entre autres de nature épistémologique, cet apprentissage de la *NoS* pouvant être implicite ou explicite[7] (Abd-El-Khalick, 2013). Les ressources et stratégies mobilisées pour introduire l'HS en cours de sciences sont diverses (Mc Comas, 2011) : anecdotes, biographies, récits historiques, reproductions d'expériences historiques, problèmes historiquement contextualisés, etc. Des recherches visent à repérer les éléments historiques susceptibles d'être introduits dans l'enseignement des sciences en identifiant des thèmes historico-scientifiques qui permettent de travailler des aspects particuliers de la *NoS* à partir de livres écrits par des historiens des sciences (McComas & Kampourakis, 2015) ou d'ouvrages destinés au public non spécialiste écrits par des épistémologues ou experts de la *NoS* (McComas, 2008). D'autres pointent des points aveugles dans les ressources historiques disponibles (Seker & Guney, 2012). D'autres encore visent à préciser des progressions d'enseignement et de formation dans le champ de la *NoS* (Abd-El-Khalick, 2012)[8], ainsi que des modalités d'évaluation (Abd-El-Khalick, 2014).

---

7 Un enseignement de la *NoS* est explicite s'il est planifié, autrement dit les objectifs d'apprentissage sont explicités et institutionnalisés à la fin d'une séquence d'enseignement. Il est implicite dans le cas contraire.

8 Signalons également les publications des groupes d'experts travaillant outre-Atlantique à la définition de *standards*, autrement dit de progressions et contenus d'enseignement, par exemple celles associées au Project 2061 lancé en 1986 aux États-Unis par l'American Association for the Advancement of Science (AAAS ; 1993). Ce projet au caractère incitatif n'a pas de caractère de contrainte nationale. Le livre publié en 1989 destiné aux enseignants et présentant ce qui doit faire partie de la culture scientifique, mathématique et technologique de tous les américains – *Science for all Americans* – contient un chapitre consacré à la nature de la science (AAAS, 1989) et un autre présentant l'histoire de dix thèmes importants pour le développement des sciences. Signalons également les publications plus récentes de 2013 du National Research Council qui explicitent des objectifs d'enseignement à poursuivre à chaque niveau d'enseignement, de l'école primaire à la fin du lycée (NGSS Lead States, 2013).

Les études sur l'impact de dispositifs innovants qui reposent sur l'introduction de l'HS donnent des résultats contrastés et les chercheurs, tels que Elder Sales Teixeira et ses collaborateurs (2012) en ce qui concerne l'enseignement de la physique, appellent à poursuivre les recherches. L'analyse systématique des études publiées dans les revues internationales que ces chercheurs ont réalisée révèle des résultats positifs, mais non partagés concernant l'apprentissage des savoirs scientifiques, ceux concernant la motivation divergeant encore plus. L'analyse pointe également des effets positifs de ces dispositifs sur la *NoS*, l'argumentation et la métacognition, effets à conforter compte tenu du très faible nombre d'études existantes. Des recherches ancrées dans le champ de la *NoS* indiquent que l'introduction de l'HS n'a un effet positif sur les représentations de la *NoS* que si les éléments historiques sont couplés à des éléments épistémologiques qui doivent être introduits en premier (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000). De plus, les effets positifs de l'introduction de l'HS semblent être associés à des séquences d'enseignement longues. Plus largement, les recherches montrent que seule une approche explicite et réflexive[9] de la *NoS* permet aux élèves de se construire une représentation de la/des science(s) proche de celle de l'épistémologie contemporaine. « Faire faire des sciences aux élèves » ne suffit pas (Khishfe, 2023).

Les recherches sur les enseignants explorent leurs représentations des sciences (Lederman, 2007) et de l'HS (Gagné, 1994), examinent comment ils introduisent l'HS (Nouri & McComas, 2021) ou mettent en œuvre des dispositifs originaux (Henke & Höttecke, 2015), proposent des dispositifs de formation (Adúriz-Bravo, 2010) et analysent l'impact de formations intégrant l'HS (Winrich & Garik, 2021). Des travaux examinent les compétences didactiques nécessaires à l'introduction de l'épistémologie et de l'HS dans l'enseignement et la formation scientifique et comment elles se développent dans le cadre de formation. Le cadre d'analyse multidimensionnel proposé par Fouad Abd-El-Khalick (2013) montre que les enseignants de sciences doivent articuler trois types de connaissances/compétences relatives au contenu scientifique, à l'épistémologie et à l'HS, ainsi qu'à l'apprentissage-enseignement (voir Figure 1).

---

[9] Les enseignants doivent engager les élèves à réfléchir sur les contenus d'épistémologie et d'HS proposés.

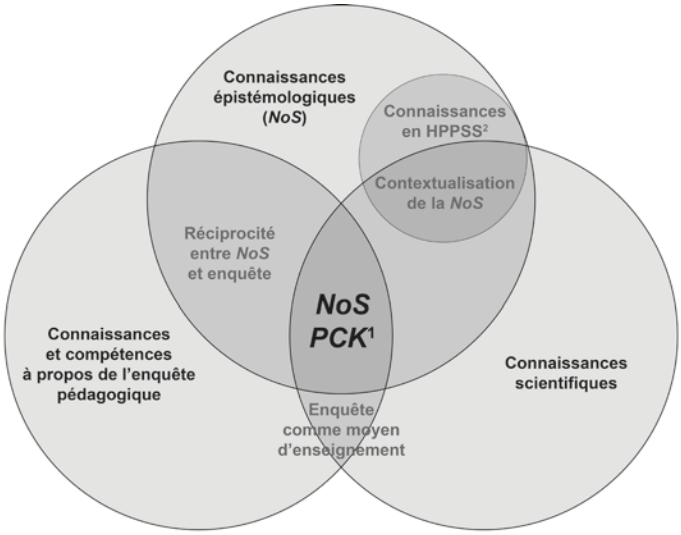


Figure 1 – Domaines de connaissance pour enseigner avec et à propos de la *NoS*.

Source : d'après Abd-El-Khalick, 2013 : 2101.

Les recherches sur l'élaboration/amélioration/validation de dispositifs innovants au sein de collectifs chercheurs-enseignants sont susceptibles d'aider les enseignants à développer les compétences nécessaires à l'introduction d'HS en classe au plus près des intentions didactiques et de permettre aux chercheurs de tenir compte des expériences des enseignants sur les possibles et les contraintes. Ce processus, qualifié de « symbiotique » par Andreas Henke et Dietmar Höttecke (2015), engage les enseignants dans une posture réflexive et de chercheur praticien telle celle valorisée dans les documents institutionnels de formation des enseignants.

Si quelques travaux analysent l'élaboration de dispositifs en termes de transposition didactique en comparant les éléments historiques introduits par les enseignants à la référence « savante » (Park *et al.*, 2023), rares sont ceux qui questionnent la nature de la référence, autrement dit le type d'histoire mobilisée. Il en est ainsi d'une recherche sur l'impact d'une

formation d'enseignants de physique qui explicite une inscription dans l'histoire conceptuelle[10] (Winrich & Garik, 2021). C'est également le cas d'une étude qui discute de la cohérence entre finalité de l'enseignement, vision de la *NoS* et type d'histoire, et qui associe la visée de formation citoyenne de l'enseignement des sciences à une appréhension de la science comme pratique, ainsi qu'à une approche historiographique plus récente appelée « histoire culturelle » (Moura & Guerra, 2016). Relevant d'une micro-histoire qui examine la science telle qu'elle est pratiquée dans un contexte donné, cette approche est celle retenue pour l'élaboration de dispositifs d'enseignement originaux adaptés au contexte du Brésil (Jardim, Guerra & Schiffer, 2021). Cet ancrage résonne avec le dispositif revendiqué par une étude qui analyse les représentations de l'HS d'élèves d'une banlieue multiculturelle de Londres, celui d'une approche interculturelle fondée sur une histoire globale (Gandolfi, 2018).

Nos choix d'organisation reposent sur plusieurs hypothèses. La réflexion sur l'introduction de l'HS dans l'enseignement requiert de s'appuyer sur les recherches les plus récentes, en particulier en philosophie et HS, et une approche interdisciplinaire. D'une part, certaines caractérisations de la/des science(s) mobilisées dans le champ de la *NoS* sont présentées comme reposant sur une approche datée (Duschl & Grandy, 2012)[11]. Comment, dans ces conditions, penser une introduction de l'HS afin d'atténuer le contraste entre la manière dont les sciences sont perçues par les élèves et les enseignants et présentées dans les programmes et manuels d'enseignement, et la manière dont elles sont décrites et

---

[10] *« Conceptual history is, to use Koselleck's (2002) term, a special history focused on the change of ideas and the meaning associated with specific words over time. »* (Winrich & Garik, 2021 : 1103)

[11] Il est à noter que depuis cet article de 2012 ont émergé dans le champ de la *NoS* d'autres approches pour caractériser la/les science(s). L'approche de Norman G. Lederman et de ses collaborateurs (Lederman, 2007, Abd-El-Khalick & Lederman, 2000), qui repose sur la définition de caractéristiques consensuelles de la science pouvant servir d'objectifs d'enseignement pour la fin de la scolarité obligatoire, a longtemps prévalu. Kostas Kampourakis (2016), ainsi que Gürol Irzik et Robert Nola (2022) montrent qu'elle ne s'oppose pas mais est complémentaire de l'approche développée par Sibel Erduran et Zoubeida R. Dagher (2014), qui consiste à analyser la science selon deux grandes dimensions : cognitivo-épistémique et socio-institutionnelle.

analysées actuellement dans la sphère académique ? D'autre part, élaborer des dispositifs d'enseignement et de formation fondés sur l'HS et cohérents avec l'épistémologie contemporaine, expérimentés et validés à des fins de diffusion auprès des enseignants et des formateurs, nécessite des connaissances en HS et épistémologie que les didacticiens des sciences n'ont pas nécessairement, et de mobiliser des approches et outils qui ne sont pas ceux des historiens et des épistémologues.

Compte tenu de nos disciplines et thématiques de recherche, la journée d'étude du 3 juin 2021 a été centrée sur un champ disciplinaire donné, la physique, et organisée autour de thèmes scientifiques aux programmes du lycée (astronomie et espace/temps, mécanique des fluides) et de caractéristiques des sciences connues pour correspondre à des difficultés pour les élèves, en lien avec les modèles et l'élaboration théorique, ainsi qu'avec les interactions théorie-empirie et sciences-techniques-sociétés.

Ce volume propose sept textes qui offrent un aperçu quasi complet de ce qui s'est tenu au cours de cette journée[12]. Il débute par un texte inscrit dans l'histoire de l'éducation et se termine par un texte de mise en perspective. Nous remercions Manuel Bächtold d'avoir assuré le rôle de grand témoin et Cécile de Hosson de contribuer au volume. Nous remercions tous les contributeurs d'avoir accepté de croiser leurs regards et de permettre ainsi de nourrir et enrichir la réflexion sur les sciences, l'éducation et la formation scientifique.

Ces sept textes ne peuvent à eux seuls que rendre compte de quelques-unes des nombreuses questions qui se posent. Nous présentons succinctement chaque article et terminons en évoquant quelques points aveugles qui mériteraient d'être explorés.

Le volume débute par deux textes qui examinent les rapports qu'entretient l'HS avec l'enseignement des sciences pour le premier et avec les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la physique pour le second.

---

[12] Le programme de cette journée est disponible en ligne : https://msh-paris-saclay.fr/apprendre-et-penser-les-sciences-dans-lenseignement-scientifique-3-06-2021/ (consulté le 19/04/2024).

C'est en historien de l'enseignement scientifique que **Pierre Savaton** aborde la récente réforme de l'enseignement de 2019. La plaçant au sein d'un tableau détaillé des différentes réformes qui se sont succédé au cours des XIX^e^ et XX^e^ siècles, il discute de la volonté exprimée par les concepteurs de programmes, dès l'origine et de façon variable, que l'enseignement scientifique fasse appel à l'HS. Au milieu du XIX^e^ siècle, la figure du scientifique est d'abord mise en avant pour sa valeur morale et l'élève est invité à la reproduction d'expériences importantes. Au tournant du XIX^e^ et du XX^e^ siècle, l'enseignant est incité à donner un aperçu du cheminement de l'esprit humain et à proposer aux élèves une démarche « récapitulative » des sciences. Si l'HS est présentée par la réforme Leygues de 1902 comme participant pleinement à la formation de l'esprit, son introduction dans l'enseignement des sciences au cours du XX^e^ siècle se heurte à des programmes d'enseignement denses, qui ne permettent que peu d'aménagements, et à l'absence de formation des professeurs du secondaire dans le domaine. Dans les années 1970, l'HS n'est plus mentionnée par les programmes ; elle refait une réapparition timide avec la réforme de 1993 par l'appel à son rôle culturel. Ce n'est qu'à partir des années 2000 qu'elle est de nouveau mentionnée, en particulier pour la mise en valeur des interactions sciences et techniques. Si elle est à présent explicitée, la difficulté qui subsiste, soulignée par l'auteur, est le difficile passage des intentions générales des programmes à une mise en place effective, dans la classe.

Cécile de Hosson questionne le rôle que le didacticien des sciences peut faire jouer à l'HS. Elle commence par revenir sur l'utilisation d'une approche « récapitulative » de la science, qui, fondée sur un parallélisme entre phylogénie (histoire du développement des êtres vivants) et psychogénétique (étude du développement psychique), propose de faire repasser (rapidement) l'enfant par les étapes historiques. Dans la lignée de Laurence Viennot en 1970 et d'autres didacticiens ensuite, elle examine dans quelle mesure les obstacles à la connaissance (au sens de Gaston Bachelard) rencontrés par les étudiants ont leur parallèle – ou pas – dans l'histoire, en s'appuyant sur deux exemples. En mécanique, c'est le lien entre les raisonnements spontanés des élèves pour expliquer le mouvement d'une pierre lancée et la théorie de l'*impetus* qui est questionné ; en optique, c'est le lien

entre les raisonnements des élèves à propos de la vision d'un objet et celui de Ibn al-Haytham (Alhazen) pour établir que la lumière va de l'objet à l'œil et non l'inverse. L'auteure examine aussi une situation expérimentale correspondant à une transposition didactique du raisonnement d'Aristote pour prouver la rotondité de la Terre. À travers ces trois exemples, elle met en avant des traits communs, mais aussi des différences notables empêchant toute identification stricte entre raisonnements spontanés d'élèves et problématiques historiques. Si l'HS peut inspirer des contextes et des questionnements à introduire en classe, il semble que le didacticien doive s'éloigner de la reconstruction proposée par l'historien pour créer sa propre narration en intégrant les élèves dans sa réflexion et aboutir ainsi à une présentation qu'ils peuvent s'approprier.

Les deux textes suivants contextualisent la discussion sur l'apport possible de l'HS à la définition de nouveaux contenus d'enseignement à des thèmes historico-scientifiques « classiques » de l'enseignement correspondant à des changements de paradigmes : la transition géo-héliocentrique, la transition mouvement circulaire-mouvement elliptique des planètes, la transition mécanique classique-relativiste. Le premier texte vise un apprentissage épistémologique, le second cherche également à favoriser une meilleure compréhension et maîtrise des concepts scientifiques en jeu. Les deux donnent à voir des aspects du processus d'élaboration théorique peu abordés dans l'enseignement des sciences : les présupposés et les valeurs dans un cas, les raisonnements mobilisés par les scientifiques eux-mêmes dans l'autre.

Si l'enseignant peut établir lui-même une base de textes historiques, les contraintes à leur rédaction sont cependant nombreuses. Se pose aussi la question de l'analyse de la pertinence de la séquence ainsi élaborée pour les élèves et de l'évolution de leurs représentations de la *NoS*. **Laurence Maurines** explore ces questions en prenant comme exemple l'introduction de l'histoire de la transition géo-héliocentrique dans un enseignement scientifique de terminale. L'étude repose sur l'analyse d'une séquence d'enseignement, avec création d'un dossier de textes historiques à partir de sources secondaires conçus pour travailler un objectif précis d'apprentissage épistémologique et répartir l'information historique sur l'ensemble des documents fournis aux élèves. Ces textes correspondent à la transposition didactique de problématiques historiques à propos du mouvement des planètes (Claude Ptolémée,

Nicolas Copernic, Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galilée, Isaac Newton) pour des élèves actuels. Les éléments d'épistémologie et d'HS introduits dans les textes, ainsi que les réponses fournies aux questionnaires pré- et post-enseignement par les élèves sont caractérisés à l'aide d'une grille d'analyse multidimensionnelle de la *NoS*. L'auteure met en relief les contraintes de cohérence (entre objectifs, contenus, modalités, évaluations) d'une telle démarche d'introduction de l'HS en classe. Un dernier questionnaire évalue la capacité acquise par les élèves pour aborder d'autres situations historiques. On voit les élèves évoluer d'un inductivisme naïf à un savoir construit par des savants au sein d'une société, les amenant ainsi à une réflexion renouvelée sur ce qu'est l'activité scientifique. Le problème de la promotion et d'une généralisation d'une telle démarche auprès des enseignants reste ouvert.

Christian Bracco s'intéresse au rôle qu'une connaissance détaillée de l'HS, plus précisément des étapes et processus d'élaboration théorique, peut revêtir pour aider à mettre en lien des contenus d'enseignement introduits actuellement de manière complètement indépendante. Il examine deux cas : les trajectoires circulaires des planètes que les élèves étudient dans le secondaire, qui deviennent elliptiques dans le supérieur ; le temps implicite absolu newtonien de la mécanique classique dans le secondaire, qui devient relativiste dans le supérieur. Aux yeux de l'auteur, cette approche dichotomique, qui renvoie d'un point de vue épistémologique à l'incommensurabilité des paradigmes de Thomas Kuhn, rend impossible tout dialogue entre les différentes théories et fait obstacle à une continuité de l'apprentissage. L'auteur montre que l'histoire nous apprend au contraire qu'il y a eu des étapes clés permettant les passages d'une théorie à une autre. Ainsi, l'équant de Kepler, basé sur un cercle déférent, clé de voûte de son astronomie, est l'approximation d'une ellipse ; le « temps local » de Hendrik Lorentz, introduit mathématiquement en 1895 pour assurer approximativement l'invariance des équations de l'électromagnétisme de James Clerk Maxwell, conduit au temps relativiste d'Albert Einstein. Ces étapes, que l'enseignement traditionnel n'a pas retenues, sans doute du fait de leur caractère transitoire ou « éphémère », sont pourtant autant d'étapes nécessaires à une bonne compréhension des connaissances en jeu et de leurs modes d'élaboration.

Les deux derniers textes traitent d'un thème peu exploré en didactique des sciences et d'exploration récente en HS : la mécanique des fluides. Ensemble, ils permettent d'aborder les rapports entre théorie et empirie sur une période allant de la fin du XVII^e^ au milieu du XX^e^ siècle, ainsi que les interactions entre communautés scientifiques et sciences-sociétés.

Clément Crastes s'intéresse à un enseignement de dynamique des fluides introduit dans le secondaire lors de la dernière réforme des programmes de la filière générale. Il l'examine dans son rapport à la modélisation et au dialogue entre théorie et empirie, aussi bien en lycée qu'en premier cycle universitaire. Les éléments d'HS qu'introduit l'auteur apparaissent comme une mise en perspective de la construction de la pensée scientifique des écoulements laminaires de fluides parfaits et visqueux (relations de Torricelli, de Bernoulli, équation d'Euler, de Navier-Stokes). Après un historique de la mécanique des fluides entre la fin du XVII^e^ siècle et la première moitié du XIX^e^ siècle, l'auteur s'attache à montrer les difficultés rencontrées par les élèves à raisonner sur la pression, la vitesse et le débit du fluide dans le cas d'une canalisation comportant un rétrécissement. Il porte un regard critique sur les ressources pédagogiques utilisées pour illustrer la perte de charge d'un écoulement et pointe des contradictions entre un schéma historique de Daniel Bernoulli, un schéma utilisé aujourd'hui dans l'enseignement et une photographie de l'expérience. Son analyse lui permet d'élaborer un document demandant de comparer deux schémas reposant sur deux interprétations contradictoires dont l'une est liée au sens commun. L'auteur discute alors des réactions d'un panel d'enseignants du supérieur face à cette ressource conçue pour revivifier le questionnement scientifique et rappeler la nécessaire confrontation des prévisions du modèle aux résultats expérimentaux et les limites du modèle. Outre cette approche critique, l'auteur propose de concevoir des ressources d'enseignement mobilisant des documents historiques pour montrer comment les modèles ont été élaborés au cours du temps, les interactions entre empirie et théorie, les difficultés rencontrées, les avancées liées aux interactions entre communautés.

Antonietta Demuro s'intéresse aux écoulements turbulents, dont l'étude fait son apparition dans un cadre expérimental lié à l'aviation au début du XX^e^ siècle, et qui relève par ailleurs des domaines de la météorologie et de l'océanologie. L'auteure discute l'intrication entre théorie et

expérience sur une période allant de 1920 à 1940, à travers les recherches menées dans différents pays (Allemagne, Grande-Bretagne, États-Unis, France) et dans les programmes universitaires les plus avancés sur l'enseignement de ces sujets nouveaux (l'Institut de mécanique des fluides de Lille en France). La prise en compte explicite de la viscosité nécessite de nouveaux outils mathématiques pour traiter l'équation de Navier-Stokes, développés tout d'abord par Ludwig Prandtl et Theodore von Kármán, puis par Geoffrey Ingram Taylor qui inaugure une méthode statistique, ainsi que de nouveaux dispositifs expérimentaux (souffleries…). En France, l'auteure étudie les travaux de Philippe Wehrlé et Georges Dedebant dans le contexte de la création d'une commission placée sous l'égide du ministère de l'Air. Ces scientifiques développent une analyse en termes de champ de variable aléatoire. L'auteure met en avant l'intérêt d'une connaissance historique des recherches sur la turbulence pour illustrer les interactions théorie-expérience, l'avènement et le devenir des théories – certaines étant abandonnées, d'autres comportant toujours des problématiques ouvertes –, la structuration du milieu de la recherche en communautés et leurs interactions, ces dernières se retrouvant en partie dans l'enseignement.

Le volume se termine par le texte du grand témoin de cette journée, **Manuel Bächtold**. Au travers de la mise en résonance des textes, l'auteur identifie deux objectifs principaux de l'appel à l'HS dans l'enseignement des sciences – l'acquisition de connaissances scientifiques et le développement de représentations riches et critiques des sciences – et repère deux enjeux éducatifs sous-jacents – former des scientifiques ou/et de futurs citoyens. Il pointe par ailleurs que l'intégration de ces objectifs dans les programmes scolaires est relativement récente et qu'elle remplace une approche antérieure qui servait à transmettre des valeurs morales en réifiant la vérité. L'auteur relève deux stratégies d'introduction de l'HS, implicite ou explicite, et deux orientations opposées relativement au contenu historique, soit épurer l'HS de certains détails pour favoriser l'acquisition de connaissances scientifiques, soit l'enrichir en mettant l'accent sur certaines étapes ou certaines dimensions des pratiques scientifiques pour développer les représentations de la/des science(s). Il termine par une discussion sur les aspects épistémologiques qui peuvent ou méritent d'être étudiés en classe

à partir de l'HS. Est ainsi souligné l'apport de l'HS pour développer l'appréhension d'un pluralisme épistémologique dans une perspective critique.

Au travers de cette journée et de ce volume, il s'est agi essentiellement de discuter et illustrer les apports possibles de l'HS à l'enseignement-apprentissage des sciences. Différentes approches ont été abordées et différentes visées d'apprentissage ont été explicitées. Diverses stratégies d'introduction de l'HS ont été présentées, et les conditions d'élaboration et d'expérimentation à des fins de diffusion de dispositifs fondés sur l'HS ont été questionnées. Différents types d'histoire ont été convoqués en fonction des objectifs d'apprentissage poursuivis. Des thèmes historico-scientifiques peu explorés dans la littérature en didactique et en HS (mécanique des fluides) ont été étudiés, notamment selon l'angle des rapports empirie-théorie et sciences-techniques-communautés. D'autres thèmes pouvant être considérés comme « des classiques de l'enseignement » (la transition géo-héliocentrique, mécanique classique-relativiste) ont été travaillés selon différents angles, afin de donner à voir les raisonnements créatifs des scientifiques, la charge théorique de l'observation et l'arrière-plan des présupposés et des valeurs.

Il s'est agi également de développer une réflexion critique sur les rapports entre l'histoire et la didactique des sciences, et de montrer la fécondité d'un rapprochement entre communautés et d'une réflexion interdisciplinaire. A ainsi été pointé que : toute histoire est une reconstruction du passé, celle de l'historien poursuivant d'autres objectifs que celle du didacticien ; la reconstruction du didacticien repose sur des connaissances et des visées didactiques qui conduisent à simplifier ou enrichir le matériau historique ; les connaissances didactiques sont susceptibles d'aider à repérer des aspects négligés par les historiens, alors que parallèlement une connaissance détaillée de l'histoire peut offrir un nouveau matériau au didacticien.

De nombreux points n'ont pas été abordés, en particulier l'apport possible de réplication d'expériences historiques[13] à l'enseignement-apprentissage des sciences et celui, crucial pour l'introduction de l'HS en classe, de la formation des enseignants et des formateurs d'enseignants. De nombreuses

[13] Voir Alisir & Irez, 2020.

questions restent ouvertes et méritent d'être explorées. Parmi elles, certaines concernent les références, plus précisément le type d'histoire à mobiliser pour élaborer un dispositif d'enseignement fondé sur l'HS. Comment penser et assurer la cohérence avec les finalités de l'enseignement des sciences (former des scientifiques *vs* de futurs citoyens), les visées d'apprentissage (scientifiques, épistémologiques, critique, entre autres), les différentes dimensions et approches de la/des science(s) et de leur histoire ? D'autres concernent les possibilités effectives de prise en charge de l'HS par les enseignants de sciences. N'y a-t-il pas lieu de penser cette introduction de l'HS dans le cadre d'une perspective curriculaire et de discuter des places et rôles des différentes disciplines scolaires (sciences mais aussi histoire-géographie, philosophie, etc.), des cohérences et complémentarités possibles entre disciplines, des différenciations entre filières d'enseignement ?

Ce sont autant de raisons et d'invitations à poursuivre la réflexion engagée au cours de cette journée lors d'autres rencontres, à développer des recherches interdisciplinaires et interdidactiques sur l'épistémologie et l'HS dans l'enseignement et la formation (en sciences).

Références bibliographiques

Abd-El-Khalick Fouad, 2012. « Examining the Sources for our Understandings About Science: Enduring Conflations and Critical Issues in Research on Nature of Science in Science Education », *International Journal of Science Education*, 34 (3), p. 353-374, https://doi.org/10.1080/09500693.2011.629013.

Abd-El-Khalick Fouad, 2013. « Teaching *With* and *About* Nature of Science, and Science Teacher Knowledge Domains », *Science & Education*, 22 (9), p. 2087-2107, https://doi.org/10.1007/s11191-012-9520-2.

Abd-El-Khalick Fouad, 2014. « The Evolving Landscape Related to Assessment of Nature of Science », in N. G. Lederman & S. K. Abell (eds), *Handbook of Research on Science Education. Volume II*, New York/London, Rouledge, p. 621-650.

abd-el-khalick Fouad & lederman Norman G. 2000. « The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science », *Journal of Research in Science Teaching*, 37 (10), p. 1057-1095, https://doi.org/10.1002/1098-2736(200012)37:10%3C1057::AID-TEA3%3E3.0.CO;2-C.

Adúriz-Bravo Agustín, 2010. « Use of the History of Science in the Design of Research-Informed NOS Materials for Teacher Education », in P. V. Kokkotas, K. S. Malamitsa & A. A. Rizaki (eds), *Adapting Historical Knowledge to the Classroom*, Rotterdam, SensePublishers, p. 195-204, https://doi.org/10.1007/978-94-6091-349-5_14.

Alisir Zeynep Neslihan & Irez Serhat, 2020. « The Effect of Replicating Historical Scientific Apparatus on High School Students' Attitudes Towards Science and Their Understanding of Nature of Science », *Science & Education*, 29 (5), p. 1201-1234, https://doi.org/10.1007/s11191-020-00148-0.

Allchin Douglas, 2011. « Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science », *Science Education*, 95 (3), p. 518-542, https://doi.org/10.1002/sce.20432.

American Association for the Advancement of Science, 1989. « The Nature of Science », *Science for All Americans: A Project 2061 Report on Literacy Goals in Science, Mathematics, and Technology*, Washington, American Association for the Advancement of Science, http://www.project2061.org/publications/sfaa/online/chap1.htm (consulté le 21/02/2024).

American Association for the Advancement of Science, 1993. *Benchmarks for Science Literacy: Project 2061*, New York, Oxford University Press, http://www.project2061.org/publications/bsl/online/index.php (consulté le 21/02/2024).

Beaufils Daniel, Maurines Laurence & Chapuis Claude, 2010. « Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique et chimie », *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 104 (924), p. 581-598.

Décamp Nicolas & Hosson Cécile de, 2012. « Implementing Eratosthenes' Discovery in the Classroom: Educational Difficulties Needing Attention », *Science & Education*, 21 (6), p. 911-920, https://doi.org/10.1007/s11191-010-9286-3.

Deng Feng, Chen Der-Thanq, Tsai Chin-Chung & Chai Ching Sing, 2011. « Students' Views of the Nature of Science: A Critical Review of Research », *Science Education*, 95 (6), p. 961-999, https://doi.org/10.1002/sce.20460.

Duschl Richard A. & Grandy Richard, 2012. « Two Views About Explicitly Teaching Nature of Science », *Science & Education*, 22 (9), p. 2109-2139, https://doi.org/10.1007/s11191-012-9539-4.

Erduran Sibel & Dagher Zoubeida R., 2014. *Reconceptualizing the Nature of Science for Science Education: Scientific Knowledge, Practices and Other Family Categories*, Dordrecht, Springer.

Gagné Benoit, 1994. « Autour de l'idée d'histoire des sciences : représentations discursives d'apprenti(e)s-enseignant(e)s de sciences », *Didaskalia*, 3, p. 61-78, https://doi.org/10.3406/didas.1994.951.

Gandolfi Haira Emanuela, 2018. « Different People in Different Places: Secondary School Students' Knowledge About History of Science », *Science & Education*, 27 (3-4), p. 259-297, https://doi.org/10.1007/s11191-018-9971-1.

Hacking Ian, 1992. « "Style" for historians and philosophers », *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 23 (1), p. 1-20.

Henke Andreas & Höttecke Dietmar, 2015. « Physics Teachers' Challenges in Using History and Philosophy of Science in Teaching », *Science & Education*, 24 (4), p.349-385, https://doi.org/10.1007/s11191-014-9737-3.

Höttecke Dietmar & Silva Cibelle C., 2011. « Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge: An Analysis of Obstacles », *Science & Education*, 20 (3-4), p. 293-316, https://doi.org/10.1007/s11191-010-9285-4.

Irzik Gürol & Nola Robert, 2023. « Revisiting the Foundations of the Family Resemblance Approach to Nature of Science: Some New Ideas », *Science & Education*, 32 (5), p. 1227-1245, https://doi.org/10.1007/s11191-022-00375-7.

Jardim Wagner Tadeu, Guerra Andreia & Schiffer Hermann, 2021. « History of Science in Physics Teaching », *Science & Education,* 30 (3), p. 609-638, https://doi.org/10.1007/s11191-020-00191-x.

Kampourakis Kostas, 2016. « The "General Aspects" Conceptualization as a Pragmatic and Effective Means to Introducing Students to Nature of Science », *Journal of Research in Science Teaching*, 53 (5), p. 667-682, https://doi.org/10.1002/tea.21305.

Khishfe Rola, 2023. « Improving Students' Conceptions of Nature of Science: A Review of the Literature », *Science & Education*, 32 (6), 1887-1931, https://doi.org/10.1007/s11191-022-00390-8.

Kermen Isabelle & Izquierdo-Aymerich Mercè, 2017. « Connaissances professionnelles didactiques des enseignants de sciences : un thème de recherche encore récent dans les recherches francophones », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 15, p. 9-32, https://doi.org/10.4000/rdst.1479.

Kind Per & Osborne Jonathan, 2017. « Styles of Scientific Reasoning: A Cultural Rationale for Science Education? », *Science Education*, 101 (1), p. 8-31, https://doi.org/10.1002/sce.21251.

Knorr-Cetina Karin, 1999. *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*, Cambridge/London, Harvard University Press.

Koselleck Reinhart, 2002. *The Practice of Conceptual History: Timing History, Spacing Concepts*, Stanford, Stanford University Press.

Lederman Norman G., 2007. « Nature of Science: Past, Present, and Future », *in* S. K. Abell, & N. G. Lederman (eds), *Handbook of Research on Science Education*, Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates, p. 831-879.

Martinand Jean-Louis, 1986. *Connaître et transformer la matière. Des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*, Berne, Peter Lang.

Maurines Laurence & Beaufils Daniel, 2011. « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, p. 271-305, https://doi.org/10.4000/rdst.444.

Maurines Laurence & Beaufils Daniel, 2013. « Teaching the Nature of Science in Physics Courses: The Contribution of Classroom Historical Inquiries", *Science & Education*, 22 (6), p. 1443-1465, https://doi.org/10.1007/s11191-012-9495-z.

McComas William F., 2008. « Seeking Historical Examples to Illustrate Key Aspects of the Nature of Science », *Science & Education*, 17 (2-3), p. 249-263, https://doi.org/10.1007/s11191-007-9081-y.

McComas William F., 2011. « The History of Science And The Future of Science Education: A Typology of Approaches to History of Science in Science Instruction », in P. V. Kokkotas, K. S. Malamitsa & A. A. Rizaki (eds), *Adapting Historical Knowledge Production to the Classroom*, Rotterdam, SensePublishers, p. 37-53, https://doi.org/10.1007/978-94-6091-349-5_3.

McComas William F. & Kampourakis Kostas, 2015. « Using the History of Biology, Chemistry, Geology, and Physics to Illustrate General Aspects of Nature of Science », *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 9 (1), p. 47-76, https://doi.org/10.26220/rev.2240.

Monk Martin & Osborne Jonathan, 1997. « Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for the Development of Pedagogy », *Science Education*, 81 (4), p. 405-424, https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4<405::AID-SCE3>3.0.CO;2-G.

Matthews Michael, 2003. « The Nature of Science in Science Teaching », *in* B. J. Fraser & K. G. Tobin (eds), *International Handbook of Science Education*, Dordrecht/Boston, Kluwer Academic, p 981-1000.

Moura Cristiano Barbosa de & Guerra Andreia, 2016. « Cultural History of Science: A Possible Path for Discussing Scientific Practices in Science Teaching? », *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 16 (3), p. 749-771.

Nouri Noushin & McComas William F., 2021. « History of Science (HOS) as a Vehicle to Communicate Aspects of Nature of Science (NOS): Multiple Cases of HOS Instructors' Perspectives Regarding NOS », *Research in Science Education*, 51 (Suppl. 1), p.289 305, https://doi.org/10.1007/s11165-019-09879-9.

NGSS Lead States, 2013. « Understanding the Scientific Enterprise: The Nature of Science in the Next Generation Science Standards », *Next Generation Science Standards: For States, By States* Washington, The National Academies Press, p. 430-436, https://nap.nationalacademies.org/read/18290/chapter/14 (consulté le 21/02/2024).

Park Wonyong, Erduran Sibel, Song Jinwoong & Kim Minchul, 2023. « "It's a Lesson With no Correct Answer": Design Issues in Preservice Teachers' Use of History of Science for Lesson Planning », *International Journal of Science Education*, 45 (3), p. 181-203, https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2154132.

Rudge David. W., Howe Eric M., 2009. « An Explicit and Reflective Approach to the Use of History to Promote Understanding of the Nature of Science », *Science & Education*, 18 (5), p. 561-580, https://doi.org/10.1007/s11191-007-9088-4.

Seker Hayati & Guney Burcu G., 2012. « History of Science in the Physics Curriculum: A Directed Content Analysis of Historical Sources », *Science & Education,* 21 (5), p. 683-703, https://doi.org/10.1007/s11191-011-9416-6.

Solbes Jordi & Traver Manel, 2003. « Against a Negative Image of Science: History of Science and the Teaching of Physics and Chemistry », *Science & Education*, 12 (7), p. 703-717, https://doi.org/10.1023/A:1025660420721.

Soler Léna, 2009. *Introduction à l'épistémologie*, Paris, Ellipses.

Teixeira Elder Sales, Greca Ileana Maria & Freire Jr. Olival, 2012. « The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions », *Science & Education*, 21 (6), p. 771-796, https://doi.org/10.1007/s11191-009-9217-3.

Winrich Charles & Garik Peter, 2021. « Integrating History of Science in In-service Physics Teacher Education: Impact on Teachers' Practice », *Science & Education*, 30 (5), p. 1099-1130, https://doi.org/10.1007/s11191-021-00219-w.

L'histoire des sciences dans l'enseignement et la formation scientifique

Une longue histoire

Pierre Savaton

La réforme de 2019 des programmes d'enseignement des sciences au lycée revendique l'introduction d'une histoire raisonnée des sciences au sein d'un enseignement scientifique commun à tous les élèves de la voie générale. Cette volonté affichée d'une prise en compte de l'histoire de la construction des sciences interroge l'historien de l'enseignement sur le caractère novateur ou non de ce discours. En réexaminant les textes officiels et les travaux historiques sur l'enseignement des sciences depuis deux siècles, et plus spécifiquement ceux relatifs à l'enseignement des sciences de la nature, nous interrogeons dans cet article la succession des discours et leur évolution. Quelles leçons pouvons-nous tirer des précédentes réformes au moment de mettre en œuvre ces nouveaux enseignements ?

Mots-clés : enseignement secondaire, histoire des sciences, réforme, culture scientifique, formation des enseignants

L'histoire de l'enseignement secondaire peut être découpée temporellement par une succession de réformes de l'organisation du système, des institutions, des plans d'études, des programmes des disciplines, des épreuves du baccalauréat, voire des modalités de formation et de recrutement des enseignants. Mais la fréquence de ces textes réformateurs n'est pas indicatrice de changements profonds. Peu de réformes ont laissé une marque durable, nombreuses ont été fort brèves ou peu mises en œuvre. On enseigne aujourd'hui dans le secondaire des disciplines définies au début du XIX^e^ siècle. Les réformes modifiant les programmes, de loin les plus nombreuses, ont régulièrement annoncé leur volonté

d'actualiser les contenus à enseigner en proposant des compléments ou des allègements, en abandonnant l'étude de tel objet pour tel autre. Sur un temps long, ces orientations ont effectivement conduit à une évolution. Ces réformes ont également proposé des changements de méthodes, de pédagogie, de démarches et, là aussi, sur un temps long, elles se sont traduites dans les faits par des évolutions. Pour le dire simplement, sous le titre d'une même discipline scolaire nous n'enseignons plus les mêmes choses et de la même manière, mais les raisons sont multiples et rendent bien difficiles une lecture causale de cette évolution. Les réformes s'enchaînant souvent sans bilan préalable ou tout au moins sans bilan systémique, il est difficile de reconstruire et de mesurer par la suite les effets directs ou indirects, pensés ou fortuits.

L'histoire de l'enseignement secondaire français des sciences s'est régulièrement intéressée à la question de la place de l'histoire des sciences dans les discours, les textes et les instructions officielles. La publication, puis la mise en œuvre depuis 2019 des nouveaux programmes de sciences de la voie générale des lycées ne peuvent que nous renvoyer à la lecture de ces travaux. L'histoire des sciences y est citée à la fois dans les objectifs généraux et dans les contenus.

En 1984, au « moment où on discute beaucoup de l'introduction de l'histoire des sciences dans les cours de physique de l'enseignement secondaire, en particulier », Nicole Hulin (1984 : 24) publie un article visant à éclairer historiquement les discussions d'alors. Mais, quatorze ans plus tard, les instructions sont toujours au stade de l'incitation et Danielle Fauque (1998) ne manque pas de s'interroger sur leur nouveauté : « Les programmes actuellement en vigueur insistent sur la nécessaire introduction d'une dimension historique dans l'enseignement scientifique français. Cette dimension historique est-elle nouvelle ou s'inscrit-elle dans une certaine tradition ? ». La création des Instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM) en 1989 a fait un temps espérer que la dimension historique et épistémologique des sciences enseignées dans le secondaire fasse désormais partie de la formation des professeurs. Le congrès de la Société française d'histoire des sciences et des techniques (SFHST) de 2004 fut l'occasion d'un bilan sur la reconnaissance académique de l'histoire des sciences en termes d'enseignements et de postes

universitaires, après vingt ans de démarches militantes. Il était en demi-teinte (Gispert, 2006). Un enseignement d'histoire des sciences était proposé dans un grand nombre d'universités, mais sa reconnaissance institutionnelle n'y était guère plus franche que dans l'enseignement secondaire. En 2005, un groupe d'historiens des sciences, formateurs en IUFM (Groupe ReForEHST[1]), organisait à l'IUFM de Montpellier une première journée d'étude consacrée aux questions de formation et de recherche en histoire des sciences. Danielle Fauque y dressait un état des lieux encourageant :

> Aujourd'hui, un enseignement d'histoire des sciences et des techniques est assuré à l'université selon des dispositions qui dépendent des niveaux d'enseignement et des départements concernés. Il est aussi dispensé à l'IUFM en formation initiale pour les futurs enseignants. Les programmes scientifiques des lycées et des collèges, en particulier, font de plus en plus appel à l'histoire des sciences et des techniques. (Fauque, 2006)

Pour arriver à ce succès, la marche a été « longue » comme titrait alors Danielle Fauque (2006). Depuis cette date, les IUFM, les concours de recrutement des enseignants, les formations universitaires et secondaires, le recrutement des enseignants-chercheurs ont connu leur lot de réformes et, si nous dressions un nouveau bilan, bien des espoirs d'hier seraient sans doute déçus.

En réunissant didacticiens et historiens des sciences pour discuter des orientations des actuels programmes de sciences des lycées, la journée d'étude du 3 juin 2021 dont est issu cet ouvrage[2] nous a donné l'occasion de revenir sur l'histoire scolaire de ces enseignements. Le propos de cet article, tiré de ma communication d'alors, vise à interroger les textes et instructions actuels pour l'enseignement des sciences dans le secondaire au regard de ceux qui les ont précédés. Quelles questions l'histoire de l'enseignement nous pose-t-elle face à ces nouveaux programmes ? Mon

---

1 Recherches et formation en épistémologie et histoire des sciences et des techniques.

2 Journée d'étude « Apprendre et penser les sciences dans l'enseignement scientifique. Vers une interdisciplinarité didactique-histoire des sciences-épistémologie. Exemples, ouvertures, et implications », organisée en distanciel par Laurence Maurines et Christian Bracco à la Maison des Sciences de l'Homme Paris-Saclay.

propos cherchera donc à replacer tout d'abord ces programmes et leur discours sur l'histoire des sciences dans un cadre historique et épistémologique, avant de s'interroger sur leur nouveauté (continuité ou rupture ?), ainsi que sur les enseignements que nous pourrions éventuellement tirer de cette longue histoire d'instructions et d'incitations officielles, en termes de difficultés, de freins ou de blocages[3].

L'histoire des sciences dans l'enseignement secondaire : une histoire vieille comme l'enseignement secondaire

La Révolution française ferma les collèges au motif principal qu'ils étaient le plus souvent tenus par des congrégations, qui exerçaient ainsi un contrôle, voire détenaient un monopole sur l'instruction et l'éducation morale. Seul un enseignement pour les garçons de 12 à 18 ans fut réorganisé à partir de 1795 avec l'établissement des écoles centrales (Belhoste éd., 1995). Ces écoles, à trois niveaux de deux ans chacun, donnaient aux sciences une place inégalée jusqu'alors en leur consacrant deux années d'études. Leur organisation fut un échec ; le nombre des garçons scolarisés était insuffisant pour assurer à la France les cadres nécessaires à son redressement. Le Premier Empire organisa alors un enseignement secondaire en créant les lycées à charge de l'état et en laissant aux communes et aux particuliers le soin, s'ils le souhaitaient, de créer à leurs charges des collèges secondaires. Les sciences mathématiques, physiques et naturelles y étaient enseignées, mais restaient secondaires par rapport aux lettres. Le modèle d'enseignement de l'Ancien Régime se réinstalla rapidement, mais sans exclure les sciences. Toutes les réformes des plans d'études et du baccalauréat au XIX^e^ siècle s'inscrivent dans une tension permanente entre les lettres et les sciences, avec la revendication de ces dernières de participer pleinement à l'instruction et à la formation.

---

[3] L'article reprend un grand nombre d'éléments et de références historiques déjà maintes fois publiés dans des articles et ouvrages d'histoire de l'enseignement auxquels nous invitons le lecteur à se reporter pour une étude plus détaillée.

Formation de l'esprit et valeur morale des sciences

La réforme des lycées de Hippolyte Fortoul en 1852 organisait l'enseignement secondaire en deux sections parallèles, de lettres et de sciences, conduisant chacune à un baccalauréat propre. La section science était pensée avec une visée utilitaire, là où les lettres et le lycée se revendiquaient comme un enseignement de l'esprit seul, par opposition aux formations spécialisées orientées vers l'acquisition de connaissances et compétences précises, pratiques pour l'exercice d'un métier ou d'une fonction. Cette bifurcation fut supprimée en 1864 et on revint à un modèle centré sur les lettres, le baccalauréat ès sciences n'étant qu'un complément au baccalauréat ès lettres. Les programmes de 1852 pour la section des lettres prévoyaient des lectures de morceaux choisis des auteurs classiques ayant écrit sur les sciences (Hulin, 1989, 1996). Le chimiste Jean-Baptiste Dumas, auteur d'un rapport en 1847 sur l'enseignement des sciences, écrivait en 1854 dans ses instructions pour l'enseignement des sciences physiques de la section des sciences :

> Quand vous exposez un sujet d'un intérêt général, résumez-en l'histoire : rendez ainsi familière la logique des inventeurs ; apprenez à vos élèves à connaître et à vénérer les noms des hommes illustres qui ont créé la science. […]. On ne saurait donc trop recommander aux professeurs de physique de commencer l'exposition de toutes les grandes théories par un précis historique très fidèle, et, au besoin, par l'exacte reproduction de l'expérience, d'où l'inventeur est parti. (Dumas, *in* Fortoul, 1854 : 412, 417-418)

Auguste Comte affirmait dans son *Cours de philosophie positive* : « on ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire » (Comte, 1892 : 67). L'ambition des instructions officielles n'était pas tant de faire connaître cette histoire des sciences que d'y puiser des exemples pour leur valeur morale. L'inventeur, devenu illustre, est un homme à montrer en exemple à ces jeunes garçons à qui on enseigne les résultats des sciences. L'intérêt pour des éléments d'histoire est aussi justifié par la volonté de se garder d'un excès de dogmatisme. « Défiez-vous des exposés abstraits. Si le besoin d'abréger amène quelquefois la nécessité de préférer une telle méthode d'exposition, qu'un coup d'œil rapide sur l'histoire de

la question vienne toujours, du moins, en donner le correctif » affirmait également Dumas (*in* Fortoul, 1854 : 412).

Mais, pour Victor Duruy, la valeur morale des sciences ne pouvait atteindre celle des lettres et cette affirmation le conduisait à mettre fin à l'expérience de la bifurcation des études. Il écrivait en 1864 dans son rapport à l'Empereur :

> Par les lettres, nous développons les sentiments affectueux, les idées morales, la raison éloquente, l'imagination, le goût du bien et du beau, et l'expérience de la vie. Par les sciences, nous faisons heureusement contrepoids aux facultés de sentiment et d'imagination, dont il faut régler et contenir l'essor ; nous plions l'esprit à la discipline sévère des méthodes de raisonnement, et nous montrons par quelle voie austère et rude il faut aller chercher la vérité. (Duruy, cité par Belhoste éd., 1995 : 389)

Pour Duruy, ce correctif scientifique ne doit arriver qu'à son heure, une fois l'élève déjà formé aux lettres, et organiser l'enseignement secondaire selon deux voies parallèles était une erreur éducative. Les sciences doivent rester subordonnées aux lettres.

En parallèle de l'enseignement classique, un enseignement spécial avec une dimension pratique s'était structuré depuis 1845 pour préparer aux professions industrielles, commerciales et agricoles. Cours spéciaux, puis enseignement spécial, sans latin, mais avec des sciences, puis enseignement secondaire spécial en 1865 avec son propre baccalauréat à partir de 1882, cette filière pouvait désormais représenter un débouché pour tous les élèves que la suppression de la bifurcation maintenait en trop grand nombre au sein des études littéraires. L'enseignement classique ne pouvait se satisfaire d'élèves peu attirés par les études littéraires, au risque d'abaisser le niveau d'exigence des humanités anciennes. La solution fut de transformer en 1891 l'enseignement secondaire spécial en un enseignement moderne, général et classique, mais sans les langues mortes, à même d'absorber un nombre croissant d'élèves et de répondre aux « besoins et transformations de la société » (Belhoste éd., 1995 : 511).

Les programmes de l'enseignement secondaire classique sont rénovés en 1890 par des allègements en sciences au nom de la primauté des lettres. Léon Bourgeois écrit :

> Pour exercer en tous sens l'intelligence et lui donner de la netteté, de la précision, de la logique, tout en la préservant d'une spécialisation hâtive qui risque de la stériliser ou de la rétrécir, pour élever et ennoblir l'individu tout entier par le commerce des grands esprits et l'exemple des œuvres les plus parfaites [...], c'est aux lettres qu'il faut s'adresser. (Bourgeois, cité par Belhoste éd., 1995 : 515, note 6)

Les sciences ne sont qu'un complément. « À cette éducation générale de l'esprit et du cœur, les sciences d'expérience et de raisonnement viendront, à leur heure, dans l'ordre et la mesure convenables, associer leurs fortes leçons, comme un complément et un correctif indispensables » (Bourgeois, cité par Belhoste éd., 1995 : 515, note 7). Les baccalauréats ès sciences et ès sciences restreint[4] sont supprimés au profit d'un baccalauréat unique de l'enseignement secondaire classique. Au bénéfice de cette réforme, il convient pourtant de verser la transformation progressive de l'enseignement des sciences physiques, d'un exposé dogmatique vers l'analyse de faits et l'expérimentation. « On demandera donc au professeur de faire servir son enseignement à la culture de l'esprit, en d'autres termes de le rendre éducatif » précise la commission des réformes. « On l'invitera, pour quelques questions qui s'y prêtent facilement, à exposer sommairement la marche qu'a suivie l'esprit humain et les tâtonnements successifs par lesquels il est passé pour arriver à la découverte de la vérité scientifique » (Belhoste éd., 1995 : 525). Jean Baptiste Dumas souhaitait déjà en 1854 que « le professeur expose sommairement la marche suivie par l'esprit humain et les tâtonnements successifs par lesquels il était passé pour arriver à la découverte de la vérité scientifique » (Hulin, 1984 : 18). La commission reprenait seulement ses propos.

L'enseignement secondaire moderne créé en 1891 entend être un enseignement de culture générale et de formation de l'esprit.

> Le professeur de sciences ne perdra pas de vue que l'objet de son enseignement n'est pas uniquement d'apprendre aux élèves un certain nombre de vérités acquises, mais qu'il est aussi, particulièrement dans le cours d'études modernes où les sciences

---

[4] Le baccalauréat ès sciences restreint comportait une composition d'histoire naturelle en lieu et place de la composition de mathématiques ; il permettait de s'inscrire en faculté de médecine.

> tiennent une plus large place, de contribuer à la culture générale de l'esprit. […]. Pour cette même raison d'éducation générale de l'esprit, le professeur ne négligera pas non plus l'histoire de la science. L'élève a parfois moins à retirer de l'exposé d'une vérité que de l'historique de sa découverte. Le génie scientifique en travail fournit à la jeunesse, par ses initiatives, ses doutes, ses erreurs même, autant que par ses succès, un enseignement éminemment suggestif et moral. (Belhoste éd., 1995 : 539)

L'histoire des sciences, entre lettres et sciences, retient l'attention du ministère.

Léon Bourgeois crée en 1892 au Collège de France la première chaire d'histoire générale des sciences et y place Pierre Laffitte, disciple et successeur incontesté d'Auguste Comte. Élie Rabier, directeur de l'enseignement secondaire, sollicite Paul Tannery pour qu'il rédige un projet de programme d'enseignement de l'histoire des sciences. Tannery, de profession ingénieur des tabacs, est déjà à cette époque une référence en histoire des sciences et, s'il n'a pas de position officielle au sein de l'Instruction publique, il peut être un conseiller officieux de premier plan. Sa situation professionnelle lui confère également une seconde expertise d'intérêt pour une réflexion sur la construction d'un enseignement moderne, qui doit se démarquer de l'enseignement classique, sans verser dans une orientation trop appliquée et pratique. Tannery écrit dans la proposition qu'il remet à Rabier en 1892 : « Le but que le professeur devra chercher à atteindre est principalement de montrer l'enchaînement rationnel qui a lié l'évolution de chacune des sciences, soit avec celle des autres, soit avec celle de la civilisation en général » (Pineau-Gonord, 2011).

> L'étude historique des sciences ne doit pas seulement s'attacher à retracer les progrès de l'esprit humain dans la connaissance de la vérité [...], elle a aussi à en rappeler les erreurs, et que c'est précisément la saine appréciation de ces erreurs qui seule peut bien faire comprendre l'importance véritable des sciences ; sans négliger l'intérêt qu'offrent les applications pratiques, il [le professeur] ne perdra pas une occasion de faire ressortir la nécessité de la science qui seule peut conduire à des conceptions justes, soit de l'univers, soit de la société humaine. (Tannery, 1907)[5]

[5] Le programme de Paul Tannery, initialement proposé en février 1892 pour un cours d'histoire des sciences dans la classe supérieure de l'enseignement moderne des lycées, fut publié en 1907 par son frère Jules Tannery.

Ce n'est pas dans l'affirmation dogmatique des résultats de la science que réside sa valeur formatrice, mais dans l'identification de ses erreurs passées. L'histoire des sciences revendique sa valeur épistémologique.

La science éducatrice

L'idée d'une science éducatrice peine toutefois à s'implanter dans l'enseignement en dépit du soutien affirmé du monde académique. Le programme de Tannery, s'il ne fut jamais officiellement adopté, marque toutefois un tournant. Le Congrès international d'histoire comparée qui se réunit à Paris en 1900 émet le vœu que l'histoire des sciences, donnée par les professeurs de sciences eux-mêmes, soit développée dans l'enseignement secondaire et reçoive une sanction à l'examen du baccalauréat (Lebon, 1903). Le Congrès international des sciences historiques réuni à Rome en 1903 souhaite également « que des rudiments d'histoire des sciences soient introduits dans les programmes des divers enseignements donnés dans les écoles secondaires » (Tannery, 1903).

La réforme de 1902, de Georges Leygues, qui unifiait les enseignements secondaires moderne et classique en un seul système d'enseignement à plusieurs sections, entendait transformer l'enseignement des sciences pour qu'il participe pleinement à la formation de l'esprit. Les critiques nombreuses sur un enseignement des sciences propre seulement à charger les esprits par un verbalisme outrancier menaçaient sérieusement sa reconnaissance et sa prétention à égaler les lettres en matière de formation de l'esprit. Certains promoteurs de l'enseignement scientifique entendaient établir de véritables humanités scientifiques (Hulin dir., 2002). Il convenait pour cela de faire des sciences physiques, chimiques et naturelles de véritables sciences expérimentales, enseignées en prenant appui sur la méthode expérimentale et en réduisant les excès de la méthode dogmatique. Lors des conférences de 1904 données au Musée pédagogique en accompagnement de la réforme, Henri Poincaré déclarait :

> Les zoologistes prétendent que le développement embryonnaire d'un animal résume en un temps très court toute l'histoire de ses ancêtres des temps géologiques. Il semble qu'il en est de même du développement des esprits. L'éducateur doit faire repasser l'enfant par où ont passé ses pères ; plus rapidement mais sans

> brûler d'étape. À ce compte, l'histoire de la science doit être notre premier guide. (Poincaré, [1908] 1920 : 135)

Louis Mangin, agrégé de sciences naturelles, déclarait, pour sa part, qu'il fallait réagir à « l'indifférence pour les travaux des anciens qu'affectent aujourd'hui les générations d'étudiants […]. Il appartient aux professeurs de l'enseignement secondaire de réagir contre cette tendance et, à propos de certaines questions, de retracer l'histoire des étapes si laborieusement conquises par la science sur l'ignorance ou le fanatisme » (Mangin, 1905 : 33).

Les occasions ne manquaient pas dans les programmes de sciences naturelles pour présenter des travaux historiques, qu'il s'agisse des recherches expérimentales sur la digestion avec Réaumur, Lazzaro Spallanzani, Nicolas Blondlot et Claude Bernard ou de l'histoire de la circulation avec Michel Servet et William Harvey. Mais les discours ne se traduisent guère dans les instructions officielles qui accompagnent les programmes et proposent seulement d'évoquer quelques grandes expériences historiques ou de citer quelques grands noms de la science pour leurs travaux et la grandeur morale de leur dévouement à la science. La contribution de l'histoire des sciences à la formation de l'esprit se réduit à un discours moralisateur et conduit à une histoire hagiographique des sciences.

La méthode historique

La question de la méthode historique est évoquée à nouveau dans le cadre de la réforme de 1925, dite de l'égalité scientifique. Il s'agit de proposer le même programme de sciences pour les sections classiques et modernes de la sixième à la première. Si la méthode historique peut être un contrepoids aux excès de la méthode dogmatique, elle ne doit surtout pas s'y substituer et reste très cosmétique :

> Nulle préoccupation historique ne doit intervenir, sauf si elle apporte de la clarté dans l'exposé ; il faut renoncer à toutes ces vieilleries qui alourdissent l'enseignement sans profit ; en revanche, il serait mauvais de laisser systématiquement dans l'ombre les noms des grands savants ; c'est avec fruit qu'on lira

> les pages les plus significatives de leurs œuvres quand l'occasion s'en présentera[6].

Il en est de même dans les commentaires au cours d'anatomie et physiologie animales et végétales des classes de mathématiques et de philosophie : « La méthode historique qui, en raison de ses lenteurs, n'est généralement pas à recommander, présentera parfois, par ses approximations successives vers la vérité scientifique, des éléments intéressants pour la solution de quelques questions. »[7]

L'histoire des sciences, lorsqu'elle est évoquée, l'est davantage en tant que caution littéraire à un enseignement scientifique abstrait que comme démarche éducative, malgré sa défense publique par des grands noms de la science, tels Paul Langevin (1926) ou Émile Picard (Bensaude-Vincent, 2005). La revue *L'enseignement scientifique* (1927-1940), émanation d'universitaires, d'inspecteurs et de professeurs du secondaire qui militent pour un développement de l'enseignement scientifique, lance une enquête auprès de ses lecteurs en 1931 (Hulin, 2005). Les questions sont claires :

> Est-il possible et souhaitable d'introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement du second degré ? Quel doit être le rôle de l'histoire des sciences dans la formation des professeurs et comment organiser son enseignement dans les facultés ? Comment en faire profiter les futurs professeurs de sciences ? Dans quelle mesure ceux-ci pourront-ils en imprégner leur enseignement et augmenter ainsi sa valeur de culture générale ? Comment en faire profiter les futurs professeurs de lettres, en particulier les philosophes et les historiens, de manière à fournir à leur enseignement des bases plus solides et une matière plus riche ?

Pierre Brunet répond :

> Je n'hésite pas à affirmer tout d'abord qu'il serait actuellement prématuré et absolument illusoire de demander l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement secondaire. Je ne songe pas, en écrivant cela, à la surcharge des programmes ; car un aménagement adéquat pourrait probablement écarter les difficultés. Mais j'estime que commencer par cette mesure serait

---

6 *Journal officiel*, 3 septembre 1925, p. 8678.

7 *Journal officiel,* 3 septembre 1925, p. 8681.

> demander à des professeurs d'enseigner ce qu'ils n'ont jamais appris. (Hulin, 2005 : 400)

La réforme Carcopino en 1941 restaurait les plans d'études de 1902 et créait une nouvelle classe de terminale baptisée sciences expérimentales. Les débats entre primauté de la méthode inductive ou de la méthode déductive relaient alors au second rang l'appui sur la dimension historique. Les instructions de 1947 pour la classe de terminale de mathématiques reviennent sur celle-ci pour la formation de l'esprit : « Nos jeunes gens ne doivent pas oublier que la Science s'est faite lentement au cours des siècles, que sa construction a exigé des efforts multiples, qu'elle s'est accompagnée de bien des tâtonnements et a subi de nombreux échecs avant d'atteindre sa forme actuelle qui ne saurait d'ailleurs être définitive. »[8] Chaque chapitre peut être une occasion d'aborder des aspects historiques, mais ceux-ci ne figurent pas au programme des épreuves du baccalauréat.

Guy Lazerges, inspecteur général et agrégé de sciences physiques tentait en 1947 de réhabiliter la démarche historique :

> Le style historique […] ne consiste pas à présenter dogmatiquement l'histoire d'une question, mais à placer les élèves en présence des faits qui initialement ont suggéré et permis de poser les problèmes, à les amener aux premières découvertes, à leur faire franchir les étapes successives marquées chacune par les noms d'un ou plusieurs savants, à les faire parvenir toujours en suivant les étapes de la pensée créatrice à l'état de la solution. De nombreux sujets peuvent et doivent être traités avantageusement par cette méthode. (Lazerges, cité par Hulin, 1984)

Méthodes inductive, déductive et historique doivent s'articuler. L'inspecteur général Charles Brunold, devenu directeur général de l'enseignement du second degré, réorganise cette distinction dans ses instructions de 1952. Il y distingue trois styles d'enseignement : dogmatique, historique et d'enquête ou de redécouverte. La méthode historique est idéale écrit-il, mais elle nécessite de disposer d'un temps d'enseignement bien supérieur à celui des plans d'études. Si elle ne peut constituer la

---

8 Instructions du 20 juin 1947, classe de mathématiques.

méthode à suivre pour l'enseignement des sciences, elle doit inspirer une nouvelle démarche d'enseignement dans laquelle l'élève est amené à parcourir en accéléré « le chemin que les savants de toutes les époques ont suivi dans la même étude » (Brunold, 1960 : 29). Brunold défend une méthode de redécouverte.

Éclipse et renaissance culturelle

La suppression des ordres primaires et secondaires, ainsi que la réorganisation générale de l'enseignement en 1959 (réforme Bérard) se font sans modification majeure des programmes et méthodes du secondaire général. La réforme du second cycle (réforme Fouchet), qui se met en place à partir de 1966, renforce l'enseignement des sciences dans les classes de première, mais les programmes ne font plus de références à l'histoire des sciences. Les trois démarches d'enseignement distinguées par Lazerges sont toutefois encore citées dans la brochure d'accompagnement des programmes. L'enseignant peut, s'il le souhaite, s'appuyer sur des éléments d'histoire des sciences, mais rien ne l'y incite vraiment. De fait, les auteurs des manuels scolaires de sciences naturelles, à l'occasion de l'étude de certains chapitres, tels ceux relatifs à l'hérédité ou à l'évolution des espèces, ne se privent pas de faire quelques références historiques à des auteurs ou expériences marquantes. Gregor Mendel et ses expériences d'hybridation des pois sont ainsi régulièrement cités, mais ses résultats et ses lois étant toujours valides en l'état, sa mention ne marque pas spécifiquement une préoccupation historique. Ces expériences historiques sont exploitées comme des expériences actuelles.

La réorganisation du premier cycle à partir de 1976 (réforme Haby ou réforme du collège unique) ne fait pas plus mention de l'histoire des sciences. Les travaux de la commission Lagarrigue ont un temps envisagé de faire une place à l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences physiques des sections littéraires, mais le projet n'a pas été soutenu. En revanche, les modifications des programmes des lycées en 1979, en laissant plus de liberté pédagogique aux enseignants de sciences des sections littéraires, ouvrent discrètement la porte à une introduction de l'histoire des sciences comme élément de culture générale dans les classes littéraires. Ainsi, les programmes de sciences physiques de premières littéraires suggèrent en 1982 d'éventuellement exploiter des expériences historiques en

lieu et place d'expériences actuelles. Pour Danielle Fauque (1998), cette liberté nouvelle s'est traduite en initiatives individuelles qui ont permis de réconcilier avec la physique-chimie des élèves dits non-scientifiques. En biologie, plusieurs éditeurs introduisent dans leurs ouvrages scolaires des classes de première A (littérature, philosophie, langues) et de première B (économique et sociale) des pages « documentation » qui portent à l'occasion sur des éléments d'histoire des sciences pour souligner les liens entre cette discipline et la philosophie par exemple. Les manuels de biologie des classes scientifiques continuent pour leur part à mentionner ponctuellement quelques éléments d'histoire des sciences relatifs à l'étude de la théorie de l'évolution ou de la génétique, mais également des grandes fonctions (système nerveux, système digestif, milieu intérieur).

Ces initiatives sont alors portées par un mouvement universitaire qui souhaite intégrer l'histoire des sciences à ses propres formations scientifiques. La réforme du premier cycle universitaire permet depuis le début des années 1970 de proposer un enseignement de *philosophie et histoire des sciences*, et les journées d'études organisées par la SFHST à Nantes en 1980 sont l'occasion d'un premier bilan de mise en œuvre. Pour ces universitaires et enseignants militants, l'histoire des sciences doit devenir un instrument d'une meilleure compréhension de la pensée scientifique et d'une perpétuelle remise en cause des connaissances acquises (Rosmorduc éd., 1975).

Les recherches en didactique des sciences qui se développent à partir des années 1970 puisent également dans l'histoire des sciences pour analyser et discuter des représentations initiales qui constituent de possibles obstacles à la construction d'un savoir scientifique. Ces convergences favorisent les expérimentations et la réflexion commune. Nicole Hulin (1984) y voit un moment privilégié pour croiser les regards et développer les collaborations. Le bilan positif de cette libre expérimentation d'une introduction d'éléments d'histoire des sciences en classe de première littéraire n'est pas étranger, selon Fauque, à son entrée en 1993 dans les classes scientifiques.

La réforme des programmes des lycées de 1993 et le remplacement des classes de terminale D (biologie) et de terminale C (mathématiques) par une unique classe de terminale S (scientifique) s'accompagnent en effet d'une invitation à introduire dans l'enseignement des sciences physiques une dimension historique et culturelle.

> L'enseignement doit faire ressortir que la physique est un élément de culture essentiel en **montrant que le monde est intelligible** et que l'extraordinaire richesse et complexité de la nature et de la technique peuvent être décrites par un petit nombre de lois universelles qui constituent **une représentation cohérente de l'univers**. Dans cet esprit, il doit faire appel à la **dimension historique** de l'évolution des idées en physique quelle que soit la classe[9].

Les commentaires à l'étude du mouvement du centre d'inertie en première scientifique illustrent la forme que peut prendre cette approche historique : « L'importance du principe d'inertie, mis en évidence par Galilée, justifie la présentation historique et (ou) littéraire de quelques aspects de la vie d'un des plus grands physiciens (on peut voir avec profit *La Vie de Galilée* de Bertholt Brecht !) »[10]. Plus classiquement, il est proposé, dans l'option physique, une option sans contenus exigibles et avec une grande liberté pédagogique, d'étudier l'historique du passage d'un système géocentré à un système héliocentré. Pour Danielle Fauque (1998), « ce programme fait vraiment appel à l'histoire des sciences en classe de terminale scientifique ». Les expériences historiques sont clairement mentionnées dans les programmes et un texte historique peut figurer dans l'épreuve écrite du baccalauréat, comme ce fut le cas en 1996 dans l'académie de Paris. En sciences de la vie et de la Terre (SVT ; nouvelle appellation de la biologie-géologie), ni les programmes, ni les commentaires ne font mention de l'histoire des sciences. Ils insistent en revanche sur la nécessité de renforcer les activités pratiques et de favoriser, dans une démarche d'investigation, les activités d'observation et d'expérimentation classiques ou assistées par ordinateur[11].

En 1998, les programmes d'enseignement, jugés trop lourds, sont aménagés avec un « recentrage sur les fondamentaux »[12]. L'histoire des sciences n'est pas exclue pour autant et les instructions officielles lui reconnaissent même une place particulière.

---

9 *Bulletin Officiel* (BO) Hors-série, 24 septembre 1992, Nouveaux programmes des classes de seconde, première et terminale des lycées, T. 2.

10 *Ibid.*, p. 38.

11 BO n° 6, 9 juin 1994, Sciences de la vie et de la Terre (Terminale S), p. 24-53.

12 BO Hors-série n° 12, 29 octobre 1998, Aménagements des programmes. Préambule par Claude Allègre.

> La science n'est pas faite de certitudes, elle est faite de questionnements et de réponses qui évoluent et se modifient avec le temps. […]. Dans bien des cas, rien ne peut remplacer l'exposé historique. […]. L'exposé historique permet de mesurer la difficulté que l'humanité a rencontrée pour résoudre des problèmes qui peuvent aujourd'hui sembler élémentaires. […]. Celui-ci a un côté culturel irremplaçable[13].

Les instructions pour l'enseignement de la physique et de la chimie le trouvent même exceptionnel : « L'aspect historique de ces disciplines a un contenu culturel exceptionnel qui permet des développements pédagogiques intéressants et surtout motivants ; cela vaut pour la mécanique (Aristote, Galilée, Newton…) comme pour l'électricité ou la structure atomique (Démocrite, Mendeleev, Bohr…). » En SVT, le texte indique en préambule : « Les aspects culturels et sociétaux fondamentaux tant en biologie qu'en science de la planète seront soulignés [...]. L'histoire offrant dans ce domaine de réelles possibilités pédagogiques, il est nécessaire d'en exposer les développements, avec leurs hésitations. »[14] Mais ces intentions ne sont guère reprises par la suite dans les contenus des programmes ou commentaires sur les méthodes. Le nouveau programme de SVT de la classe de seconde, publié en 1999 pour application à la rentrée 2000, commence par affirmer qu'il vise « à apporter les éléments de connaissance et plus largement de culture permettant de saisir les enjeux éthiques et sociaux auxquels est confronté le citoyen de notre temps », mais ne parle qu'une seule fois d'histoire des sciences, pour signaler que les expériences historiques sur la structure et les fonctions de l'ADN « ne sont pas au programme »[15]. Un des trois thèmes du programme de spécialité SVT de terminale scientifique s'intitule : « Des débuts de la génétique aux enjeux actuels des biotechnologies ». Il se démarque en revanche des programmes antérieurs par sa construction selon une perspective historique et épistémologique, et propose clairement d'étudier les apports historiques

---

13 BO Hors-série n° 6, 12 août 1999, Programmes des lycées, Annexe 1 : L'enseignement des sciences au lycée, p. 6.

14 BO Hors-série n° 12, 29 octobre 1998, Aménagements des programmes.

15 BO Hors-série n° 6, 12 août 1999, Programmes des lycées, Annexe 1 : L'enseignement des sciences au lycée, p. 28.

de Mendel puis des auteurs majeurs de l'histoire de la génétique[16]. Ce thème « est un moment privilégié pour aborder la nature des théories scientifiques : ce ne sont pas des réalités découvertes mais des constructions intellectuelles qui reflètent l'idée que l'on se fait de la réalité à un moment donné de l'histoire des sciences »[17]. L'élève « doit comprendre que les travaux de Mendel entraînent une rupture conceptuelle [et] réfutent l'hérédité par mélange ». « Il est nécessaire de situer les travaux de Mendel dans l'histoire des connaissances […]. À l'époque Mendel ne dispose pas des outils conceptuels qui lui permettraient d'aboutir à la distinction que nous faisons actuellement entre génotype et phénotype. » Pour ce qui est de l'enseignement de l'évolution dans le programme obligatoire de SVT de terminale, il est précisé que « la présentation et la discussion de différentes théories de l'évolution » ne sont pas exigibles[18].

Entre démarche et perspective historiques

Les nouveaux programmes de SVT des classes de sixième pour la rentrée 2005 voient dans l'histoire des sciences une opportunité de motivation pour les élèves, en favorisant leur curiosité.

> [Elle] permet de les faire réfléchir sur la façon dont se construisent les savoirs, de manière rarement linéaire et progressive mais par tâtonnements, par remise en cause de théories incomplètes ou erronées. C'est également une façon de prendre en considération les représentations et obstacles qui existent à chaque étape des apprentissages. Dans cette perspective, l'enseignement doit au moins intégrer une activité par niveau basée, sur un évènement scientifique de portée historique[19].

Au-delà des éléments de motivation pour l'étude des sciences, ils y trouvent un intérêt pour faire réfléchir les élèves sur la façon dont se

---

16 BO Hors-série n° 5, 30 août 2001, Programme de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre en classe de terminale de la série scientifique.

17 Centre national de documentation pédagogique (CNDP), Collection lycée, série Accompagnement des programmes n° 10, juin 2002, Sciences de la vie et de la Terre, p. 5.

18 BO Hors-série n° 11, 28 novembre 2002, SVT, classe de terminale de la série S, p. 66.

19 BO Hors-série n° 5, 9 septembre 2004, Programmes des collèges, Sciences de la vie et de la Terre, Classe de sixième, p. 20.

construisent les savoirs scientifiques et pour travailler en classe la question des représentations et des obstacles. La préoccupation didactique y est majeure. L'année suivante, les programmes de sciences des classes du cycle central (classes de cinquième et de quatrième) revendiquent la contribution de l'histoire des sciences à la construction de la culture scientifique attendue d'un élève à la sortie du collège. « La perspective historique donne une vision cohérente des sciences et des techniques et de leur développement conjoint. Elle permet de présenter les connaissances scientifiques comme une construction humaine progressive et non comme un ensemble de vérités révélées. Elle éclaire par des exemples le caractère réciproque des interactions entre sciences et techniques. »[20] Comme toujours, il est difficile de retrouver la traduction des propos liminaires dans les contenus et orientations des programmes à l'échelle des disciplines. En physique-chimie, l'introduction générale en reprend l'idée : « L'enseignement doit faire ressortir que la physique et la chimie sont des éléments de culture essentiels en montrant que le monde est intelligible [...]. Dans cet esprit, il doit faire appel à la dimension historique de l'évolution des idées. »[21] Mais, l'intention ne se traduit pas dans les contenus des programmes des matières elles-mêmes et renvoie à une intégration de la dimension historique dans le programme des thèmes de convergence (enseignement inclus dans les différentes disciplines et sans horaires spécifiques). La présentation des apports envisageables pour chacune des disciplines laisse la porte ouverte à des initiatives personnelles, sans plus de cadrages. Les activités proposées par le programme de SVT de la classe de sixième mentionnent trois fois l'histoire des sciences, mais pour des activités guère en phase avec les déclarations préalables sur l'intérêt de l'histoire des sciences : « exploitation des résultats d'un ensachage de fleurs », « conception et/ou réalisation de cultures expérimentales pour mettre en évidence des besoins nutritifs d'une plante chlorophyllienne », « mise en relation de l'évolution du concept de cellule et de l'évolution

---

20 BO Hors-série n° 5, 25 août 2005, Programmes des collèges, Annexe 1 : Introduction commune à l'ensemble des disciplines scientifiques, p. 4.

21 *Ibid.*, Annexe 4, p. 39.

des techniques d'observation »[22]. Aucune des activités proposées dans le programme de cinquième ne se réfère à l'histoire des sciences. En classe de quatrième, une mention est faite à « l'analyse de documents concernant la théorie de Wegener » et une autre à « l'étude de textes et de dessins historiques montrant différentes conceptions de la reproduction humaine »[23]. L'intérêt pour l'introduction d'une perspective historique est bien limité. Elle relève entièrement des choix pédagogiques des enseignants.

La réforme des programmes des collèges de 2008 (introduction du socle commun de connaissances et de compétences) réaffirme le rôle d'une perspective historique dans la constitution d'une culture scientifique et technologique commune. « La perspective historique donne une vision cohérente des sciences et des techniques et de leur développement conjoint. Elle permet de présenter les connaissances scientifiques comme une construction humaine progressive et non comme un ensemble de vérités révélées. Elle éclaire par des exemples le caractère réciproque des interactions entre sciences et techniques. »[24] Les programmes de SVT proposent de situer des découvertes scientifiques dans le temps, de mener une étude critique de textes historiques (sur la digestion ou la circulation sanguine par exemple en classe de cinquième ou sur l'évolution en classe de troisième) ou de représentations historiques (dessins historiques montrant différentes conceptions de la reproduction humaine en classe de quatrième) et d'exploiter des résultats d'expériences historiques (ablations, greffes d'organes en classe de quatrième)[25]. Ceux de physique et de chimie proposent, en annexe, des textes pour le professeur ou des

---

22 BO Hors-série n° 5, 9 septembre 2004, Programmes des collèges, Sciences de la vie et de la Terre, Classe de sixième, p. 23.

23 BO Hors-série n° 5, 25 août 2005, Programmes des collèges, Sciences de la vie et de la Terre, Classe de quatrième, p. 32, 35.

24 BO spécial n° 6, 28 août 2008, Programmes du collège, Introduction commune [culture scientifique et technologique], p 2.

25 BO spécial n° 6, 28 août 2008, Programmes du collège. Programme d'enseignement de SVT.

documents pour l'élève autour d'une approche[26] historique de l'électron, de l'atome, des phénomènes électromagnétiques ou de l'utilisation d'un alternateur. Cette proposition de ressources ne pouvait qu'être un plus pour des enseignants bien démunis sur ces sujets.

Le programme de physique-chimie de la classe de seconde générale et technologique de 2010 présente en préambule l'intérêt d'une mise en perspective historique.

> La science a été élaborée par des hommes et des femmes, vivant dans un contexte temporel, géographique et sociétal donné. En remettant en cause les conceptions du monde et la place de l'Homme, son progrès s'est souvent heurté aux conservatismes, aux traditions, aux arguments d'autorité, aux obscurantismes de toutes sortes. En ce sens, faire connaître à l'élève l'histoire de la construction de la connaissance scientifique est source d'inspiration pour la liberté intellectuelle, l'esprit critique et la volonté de persévérer. Elle est également une école d'humilité et de patience dans la mesure où cette histoire s'est accompagnée d'un impressionnant cortège d'hypothèses fausses, de notions erronées autant que de controverses passionnées. L'approche historique montre que la science moderne, qui transcende les différences culturelles, est universelle et qu'elle est désormais le bien de l'humanité tout entière[27].

Cet intérêt se traduit dans les programmes par la mention de l'étude des aspects historiques des extractions, séparations et identifications d'espèces chimiques dans la colonne « notions et contenus ». Le programme de SVT de cette même classe entend concilier sa démarche d'investigation défendue depuis des années et la démarche historique.

> L'approche historique d'une question scientifique peut-être une manière originale de construire une démarche d'investigation. L'histoire de l'élaboration d'une connaissance scientifique, celle de sa modification au cours du temps, sont des moyens utiles pour comprendre la nature de la connaissance scientifique et son

---

[26] Seuls des enseignants et des formateurs avertis sont informés de cette ressource de nos jours, car elle a disparu du site destiné aux enseignants lors de la réforme suivante des programmes de collège, comme c'est le cas pour toutes les réformes.

[27] BO spécial n° 4, 29 avril 2010, Programme d'enseignement de physique-chimie en classe de seconde générale et technologique, p. 2.

> mode de construction, avec ses avancées et éventuelles régressions. Il conviendra de veiller à ce que cette approche ne conduise pas à la simple évocation d'une succession événementielle et à ne pas caricaturer cette histoire au point de donner une fausse idée de la démonstration scientifique : si certains arguments ont une importance historique majeure, il est rare qu'un seul d'entre eux suffise à entraîner une évolution décisive des connaissances scientifiques ; de même, il serait vain de prétendre faire « réinventer » par les élèves, en une ou deux séances, ce qui a nécessité le travail de plusieurs générations de chercheurs[28].

Concrètement, les enseignants sont invités à mettre en œuvre une démarche historique pour l'étude de certains thèmes de SVT, telles, en classe de seconde, l'étude de la structure de l'ADN et de la nature du message codé ou la construction du modèle de la boucle de régulation nerveuse. L'enseignement de sciences des classes de première des séries économique et sociale et littéraire propose de s'appuyer à l'occasion sur des textes historiques pour aider les élèves à comprendre la genèse et l'évolution de certains concepts[29]. Les SVT comportent une « approche historique de la conception de la vision » ou de la transformation et de la conservation des aliments. En classe de première de l'enseignement scientifique, le programme de physique-chimie réaffirme son intérêt didactique pour une perspective historique :

> Sans tomber dans la systématisation, l'enseignant peut utiliser l'approche historique comme démarche didactique destinée à mettre la science en contexte et en culture. Cette approche montre en outre l'obstacle épistémologique opposé à la connaissance par les apparences sensibles, qui se retrouve dans les blocages créés par les représentations a priori des élèves. Ceux-ci peuvent en retour être rassurés par le spectacle des erreurs commises par de grands esprits tout au long de l'histoire de la pensée scientifique. L'histoire des sciences montre également la diversité de la démarche scientifique, qui ne se réduit pas à une progression séquentielle : observation – modélisation – vérification (ou réfutation), illustrée par la démarche d'investigation, qui est

---

[28] BO spécial n° 4, 29 avril 2010, Programme de Sciences de la vie et de la Terre en classe de seconde générale et technologique, p. 3-4.

[29] BO spécial n° 9, 30 septembre 2010, Programme d'enseignement spécifique de sciences en classe de première.

> d'essence pédagogique. La réalité historique est beaucoup plus complexe[30].

Cela ne se traduit dans les programmes que par une mention lors de l'étude de la notion de champ. Les programmes de SVT pour cette classe de première scientifique vont en revanche beaucoup plus loin en proposant l'étude de l'histoire du modèle de la tectonique des plaques. « Il s'agit, en s'appuyant sur une démarche historique, de comprendre comment ce modèle a peu à peu été construit au cours de l'histoire des sciences et de le compléter. »[31] Cet exemple doit conduire les élèves à « comprendre quelques caractéristiques du mode de construction des théories scientifiques ». Cette étude historique est limitée à quelques étapes significatives de l'histoire du modèle de la tectonique des plaques, au risque parfois d'une vision tronquée, voire réductrice (Savaton, 2011). Cette proposition d'étude de l'histoire d'un modèle scientifique est une première pour l'enseignement des SVT : elle est supprimée en 2019.

L'approche par compétences qui marque la réforme de 2010 des lycées s'est traduite par une volonté de réduire les volumes des connaissances à acquérir pour privilégier les apprentissages méthodologiques. Les instructions pour la classe de terminale de SVT de 2011 argumentent ce choix par celui de développer l'approche historique de la construction des savoirs : « Si les connaissances scientifiques à mémoriser sont raisonnables, c'est pour permettre aux enseignants de consacrer du temps pour faire comprendre ce qu'est le savoir scientifique, son mode de construction et son évolution au cours de l'histoire des sciences. »[32] Mais, une fois de plus, la traduction de cette intention laisse à désirer : aucune mention explicite à l'histoire des sciences, alors que les thèmes scientifiques étudiés s'y prêtent fort bien et que mention est faite en classes de seconde et de première.

Les programmes de SVT des collèges sont à nouveau modifiés en 2016. « Identifier par l'histoire des sciences et des techniques comment se

---

30 BO spécial n° 9, 30 septembre 2010, Programmes d'enseignement spécifique de Physique-Chimie en classe de première de la série scientifique, p. 92.

31 BO spécial n° 9, 30 septembre 2010, Programmes de SVT des classes de première.

32 BO spécial n° 8, 13 octobre 2011, Annexe : Programme de SVT, classe de terminale de la série scientifique, Préambule.

construit un savoir scientifique » fait désormais partie des compétences à travailler. En cycle 4, le programme précise que le thème *La Terre dans le système solaire* « se prête à l'histoire des sciences, lorsque l'élève situe, dans son contexte historique et technique, l'évolution des idées, par exemple sur la forme de la Terre, sa position par rapport au soleil, la dérive des continents »[33]. Explicitement ou implicitement l'enseignant est invité pour chacun des grands thèmes du programme à introduire à un moment ou un autre une perspective historique. Il est encouragé également à travailler en lien avec ses collègues d'histoire, de physique-chimie et de mathématiques sur les théories scientifiques et les changements de vision du monde, et notamment sur Alfred Wegener et la dérive des continents, et Charles Darwin et l'évolution.

Les propositions de l'actuelle réforme (2019) : rupture et continuité

Les programmes d'enseignement des sciences de 2019 s'inscrivent dans la continuité des objectifs généraux des décennies précédentes : aider à la construction d'une culture scientifique commune fondée sur des connaissances considérées comme valides tant qu'elles résistent à l'épreuve des faits (naturels ou expérimentaux) et des modes de raisonnement propres aux sciences ; participer à la formation de l'esprit critique et à l'éducation citoyenne par la prise de conscience du rôle des sciences dans la compréhension du monde et le développement de qualités intellectuelles générales par la pratique de raisonnements scientifiques ; préparer les futures études supérieures de ceux qui poursuivront après le baccalauréat dans des filières scientifiques[34].

La nouveauté vient de la suppression des sections au profit d'un enseignement commun avec des choix d'enseignements de spécialités. Les combinaisons de disciplines qui caractérisaient les plans d'études des lycées sont remplacées par des combinaisons personnalisables et évolutives sur les trois années du lycée. Mais, dans le même temps, par souci d'assurer un socle commun de connaissances, et notamment une culture scientifique

---

[33] BO n° 48, 24 décembre 2015, Programmes pour les cycles 2, 3 et 4, Cycle 4, Sciences de la vie et de la Terre, p. 339.

[34] BO spécial n° 1, 22 janvier 2019, Programmes des lycées.

commune, un enseignement obligatoire des sciences est construit en voie générale. Il regroupe autour de quelques thèmes les mathématiques, les sciences physiques et chimiques, et les SVT. À celui-ci peut s'ajouter, selon les choix des élèves, des enseignements disciplinaires spécialisés, et notamment des enseignements de mathématiques, sciences physiques et chimiques et SVT. Notre propos se bornera à l'analyse de la place de l'histoire des sciences dans cet enseignement commun des sciences et dans les enseignements scientifiques spécialisés.

« L'histoire des sciences raconte une aventure de l'esprit humain, lancé dans une exploration du monde [la science pour savoir] et dans une action sur le monde [la science pour faire] » annonce le Conseil supérieur des programmes (CSP) dans le préambule de sa présentation de l'enseignement scientifique commun de la classe de terminale de la voie générale. « La science construit peu à peu un corpus de connaissances grâce à des méthodes spécifiques : elle élabore un ensemble de théories, établit des lois, invente des concepts, découvre des mécanismes ; cet ensemble se perfectionne par la confrontation à des faits nouvellement connus, souvent en lien avec l'évolution des techniques. Le savoir scientifique est une construction collective qui a une histoire. » [35]« La compréhension de l'histoire des savoirs scientifiques et de leur mode de construction, la pratique véritable d'une démarche scientifique (y compris dans sa dimension concrète) développent des qualités de l'esprit utiles à tous. »[36] « L'enseignement scientifique s'appuie sur l'histoire des sciences et s'ancre dans la pratique de démarches scientifiques. Il vise à développer chez chaque élève un esprit rationnel, autonome et éclairé, à même de l'aider à prendre sa place en tant que personne et en tant que citoyen. »[37]

Les textes qui cadrent et encadrent les programmes d'enseignement des sciences au lycée affichent clairement leur intention de faire de la compréhension de la nature du savoir scientifique et de ses méthodes d'élaboration un des objectifs généraux de formation. L'acquisition de

---

35 Conseil supérieur des programmes (CSP), Enseignement scientifique, mai 2019, https://www.education.gouv.fr/sites/default/files/imported_files/document/Tle_Enseignement_scientifique_Commun_Voie_G_1128759.pdf (consulté le 14/09/2022), p. 2.

36 *Ibid.*

37 Source : https://www.reseau-canope.fr/nouveaux-programmes/ressources-audiovisuelles/enseignement-scientifique.html (consulté le 14/09/2022).

savoirs et savoir-faire scientifiques doit être en permanence associée à la compréhension de leur nature et de leur construction. La question de la *Nature of Science* (*NoS*), pour reprendre l'expression anglaise, est centrale. Son étude peut s'appuyer sur l'histoire et l'épistémologie des sciences, mais aussi sur la philosophie ou la sociologie des sciences. En classe de terminale, l'étude des questions d'épistémologie et d'éthique peut être l'occasion d'un éclairage conjoint des enseignements de sciences et de philosophie. C'est dans ce cadre que le CSP suggère de s'appuyer sur une histoire raisonnée des sciences.

> L'une des manières de comprendre comment se construit le savoir scientifique est de retracer le cheminement effectif de sa construction au cours de l'histoire des sciences. Il ne s'agit pas de donner à l'élève l'illusion qu'il trouve en quelques minutes ce qui a demandé le travail de nombreuses générations de chercheurs, mais plutôt, en se focalisant sur un petit nombre d'étapes bien choisies de l'histoire des sciences, de faire comprendre le rôle clé joué par certaines découvertes. Le rôle prépondérant joué parfois par tel ou tel chercheur sera souligné. Ce sera aussi l'occasion de montrer que l'histoire du savoir scientifique est une aventure humaine. Des controverses, parfois dramatiques, agitent la communauté scientifique. Ainsi, peu à peu, le savoir progresse et se précise[38].

Ces phrases sont l'écho direct de textes officiels déjà fort anciens et cela ne manque pas de nous interroger sur leur réactualisation et sur leur chance d'être entendues aujourd'hui après avoir été négligées hier.

Les programmes de l'enseignement scientifique des classes de première et de terminale de la voie générale sont construits sur le même modèle. Aux programmes classiques se substituent un programme par grandes thématiques favorables au croisement des approches et des contenus plus traditionnels des disciplines scientifiques. L'objectif prioritaire est de concilier des objectifs généraux de formation, transdisciplinaires et des objectifs d'acquisition de connaissances thématiques, interdisciplinaires. Par objectifs généraux de formation, il faut entendre le triptyque « comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration »

---

[38] CSP, Enseignement scientifique, mai 2019, https://www.education.gouv.fr/sites/default/files/imported_files/document/Tle_Enseignement_scientifique_Commun_Voie_G_1128759.pdf (consulté le 14/09/2022).

(objets et méthodes), « identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques » (pratiques), « identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement » (rapports science et société). Chacun des thèmes à étudier doit être abordé à partir d'une réflexion historique, éthique ou économique préalable pour donner du sens en situant les sujets dans leurs rapports science et société. La dimension historique des savoirs est clairement revendiquée. En classe de première, l'étude de la matière doit articuler les éléments chimiques, les cristaux et les cellules vivantes, l'étude du Soleil réunit rayonnement solaire, bilan radiatif terrestre, photosynthèse et bilan thermique du corps humain, l'étude de la Terre comprend celle de sa forme, de son âge et de sa place dans l'Univers. Enfin, un quatrième thème porte sur le son et la musique et réunit l'étude du phénomène vibratoire, l'art de faire entendre les nombres et les techniques numériques de codage. Le programme de ces quatre thèmes propose des pistes historiques à travers des noms de savants contributeurs ou des observations et mesures déterminantes pour l'histoire de la construction de ces concepts. En classe de terminale, les programmes attendent un rapprochement de cet enseignement avec celui de la philosophie en ce qui concerne les questions d'épistémologie et d'éthique. Les trois thèmes retenus sont : Science, climat et société, le futur des énergies et une histoire du vivant. La rubrique histoire, enjeux et débats propose quelques pistes du champ de l'histoire des techniques (histoire de la distribution de l'énergie électrique, essor de l'électromagnétisme au XIX^e^ siècle), de l'histoire de la théorie de l'évolution, de l'histoire de la biologie médicale et de l'histoire du traitement de l'information. Les thématiques des éclairages historiques attendus sont nouvelles pour la plupart dans l'histoire de l'enseignement des sciences dans le secondaire et posent d'emblée la question de l'anticipation de cette réforme dans la formation des enseignants et la mise à disposition de ressources pour l'enseignement. Nous y reviendrons plus loin dans cet article.

Les programmes disciplinaires de physique-chimie sont assez proches dans les thématiques et l'orientation de la classe de première de celles de l'enseignement scientifique commun : constitution et transformations de la matière, mouvements et interactions, énergie, ondes et signaux. « Dès qu'elle est possible, une mise en perspective des savoirs avec l'histoire des

sciences et l'actualité scientifique est fortement recommandée » précise le texte aussi bien en classe de seconde, que de première et terminale générales, mais sans traduction explicite dans les programmes présentés sous forme de contenus et de capacités exigibles[39]. La proximité avec l'enseignement scientifique commun peut encourager à reporter sur celui-ci l'approche science et société. L'enseignant est invité à introduire des éléments d'histoire des sciences, mais cela relève entièrement de ses choix personnels.

Les programmes disciplinaires de SVT sont un peu plus explicites. Une mention est faite dans le programme de la classe de seconde à l'occasion de l'étude des hormones sexuelles et des neurohormones hypothalamo-hypophysaires. En classe de première, les textes invitent à « présenter une démarche historique sur l'identification ou la composition chimique des chromosomes », et à « mener une démarche historique ou une étude documentaire sur le séquençage des macromolécules » ou sur « la découverte des ARN messagers »[40]. En classe de terminale, la démarche historique est évoquée une fois à propos de l'étude de la régulation de la glycémie, en proposant de réaliser un protocole expérimental à partir de l'expérience historique de Claude Bernard, dite du « foie lavé ». Au bilan, la prise en considération des apports de la méthode historique est bien limitée.

Les programmes disciplinaires de mathématiques font sensiblement plus de place à certains aspects de l'histoire des mathématiques, surtout en terminale où l'histoire de la discipline et la démarche historique trouvent régulièrement leur place dans les contenus scientifiques et les démarches pédagogiques. La référence à l'histoire des connaissances y est historiquement mieux ancrée.

Si les discours généraux de la réforme de 2019 insistent sur l'intérêt d'une mise en perspective historique des savoirs scientifiques, force est de constater que cela ne se traduit guère dans les programmes. Ce qui peut sembler être un gain avec la création d'un enseignement scientifique

---

39 BO spécial n° 1, 22 janvier 2019, Programmes des lycées.

40 BO spécial n°1, 22 janvier 2019, Programme d'enseignement de spécialité de sciences de la vie et de la Terre de la classe de première de la voie générale, Annexe, p. 6.

commun ne fait au mieux qu'équilibrer ce qui est perdu au sein de certains enseignements disciplinaires. L'approche historique et épistémologique du modèle de la tectonique des plaques en classe de première scientifique a été supprimée. On peut se dire que son traitement n'a sans doute jamais été à la hauteur des attentes, mais sa disparition signe un recul, au moins dans les ambitions affichées. Les raisons de cette régression nous interrogent sur les réelles chances de mise en œuvre des programmes de 2019.

Les enseignants de ces disciplines sont-ils en mesure d'introduire une perspective historique dans leur enseignement scientifique ? Anne Burban, inspectrice générale de mathématiques, répondait en mai 2019 lors des journées du Plan national de formation consacrées à la mise en œuvre de ce nouvel enseignement scientifique commun : « Nous sommes parfaitement conscients que les professeurs n'ont pas une culture initiale qui leur permette de le faire sans appuis, sans aides […], sans ressources. » Henri Bouasse, agrégé de physique, écrivait en 1896 à propos de l'intérêt de développer ou non la méthode historique : « Mais, à quoi bon discuter la méthode ; elle est inapplicable en fait. Je ne voudrais blesser ni mes collègues ni moi-même par un examen de conscience trop sévère ; mais combien parmi nous seraient capables d'un tel enseignement, à supposer qu'il soit le meilleur » (Bouasse, cité par Hulin, 1984 : 21). Bouasse, très critique vis-à-vis d'un éventuel enseignement de l'histoire des sciences, dénonçait l'absence de formation en histoire des sciences des professeurs de sciences et déplorait qu'aucune épreuve ne vienne vérifier ces connaissances lors du concours de l'agrégation. Comment leur demander d'enseigner ce qu'ils n'ont pas appris et ce que les concours ne vérifient pas, s'interrogeait-il ?

La place et l'évolution historique de l'histoire des sciences dans les plans d'études et programmes scolaires de science conduit inévitablement à se poser la question des conditions de la mise en œuvre de ces programmes, et par conséquent celle de la formation des enseignants. Nicole Hulin concluait son article de 1984 en écrivant : « Le problème fondamental qui se pose est celui de la formation des maîtres […]. Pour effectuer un enseignement d'histoire des sciences, il faut une double connaissance de l'histoire et de la science. Il faut noter l'absence de documents appropriés

à l'usage des professeurs, c'est-à-dire des morceaux choisis accompagnés de commentaires » (Hulin, 1984 : 24).

Conclusion. Quels enseignements tirer de cette histoire ?

Depuis plus de deux siècles d'enseignement des sciences dans le secondaire, la question de l'enseignement de l'histoire de ces sciences a été régulièrement soulevée. Les instructions officielles n'ont jamais proposé d'ajouter à l'enseignement des sciences un enseignement distinct d'histoire des sciences, mais d'introduire des éléments d'histoire pour replacer les sciences dans une histoire humaine, pour l'associer à des valeurs morales, pour la faire participer à la formation d'un esprit rationnel, pour constituer des humanités scientifiques, pour réduire l'abstraction excessive d'un enseignement dogmatique, pour éveiller la curiosité, donner de l'intérêt, motiver, modifier des représentations erronées, faire réfléchir aux conditions de construction des savoirs scientifiques, développer l'esprit critique, apprendre à distinguer la science des croyances, former des citoyens modernes… L'étude des sciences par la méthode historique n'a jamais été proposée, car d'emblée on a jugé que cette méthode nécessitait beaucoup trop de temps pour être compatible avec le volume des connaissances que l'on souhaitait faire étudier et le volume des plans d'études. Tout juste a-t-on envisagé de s'en inspirer à travers une méthode de reconstruction en accéléré de la marche des sciences. La proximité entre l'histoire des sciences et l'épistémologie dans son acceptation française a porté un intérêt à l'histoire pour l'identification d'obstacles épistémologiques indicateurs d'obstacles au cours des apprentissages. Le développement des recherches en didactique des sciences à partir des années 1970, marquées par un ancrage dans une épistémologie bachelardienne, a renouvelé l'intérêt pour l'histoire des sciences comme outil d'une réflexion critique sur la nature des savoirs et des apprentissages scientifiques, mais l'a aussi orientée vers une épistémologie historique très spécifique. La massification et la démocratisation de l'enseignement secondaire dans le même temps ont conduit à reconsidérer les méthodes, les outils et les formes des enseignements-apprentissages ouvrant la porte à des innovations pédagogiques et didactiques qui ont pu s'appuyer parfois sur l'histoire des sciences.

À la lecture des travaux des historiens de l'enseignement, et plus spécifiquement de ceux portant sur l'histoire des sciences dans l'enseignement secondaire, on ne peut s'empêcher de s'interroger sur la réelle nouveauté méthodologique des réformes successives des programmes. Est-on arrivé au bout d'une longue marche ou l'horizon ne cesse-t-il de s'éloigner quand on l'approche ? Qu'y a-t-il de nouveau dans les programmes et instructions ?

Peut-on raisonnablement considérer que l'histoire des sciences alimente aujourd'hui une réflexion au sein de nos enseignements scolaires sur la nature des sciences ? Peut-on plus modestement même considérer que s'appuyer sur un texte historique relatant une expérience, décrivant un protocole ou des résultats, développant l'argumentation d'une conclusion est désormais une pratique courante ? Nombreux sont les travaux, discours et publications qui ont discuté de l'intérêt de l'histoire des sciences dans l'enseignement scolaire ou universitaire des sciences. Historiens, épistémologues, philosophes et scientifiques ont défendu et défendent une prise en compte de l'histoire et de l'épistémologie des sciences dans les enseignements-apprentissages de sciences, mais pour autant les orientations et pratiques d'enseignement n'évoluent guère en ce sens.

On ne peut dès lors s'empêcher de s'interroger sur les raisons de cet immobilisme ou tout au moins de cette extrême lenteur à faire bouger les lignes. Les programmes et instructions ne suffisent pas à faire changer les pratiques tant qu'ils ne sont pas portés par une adhésion des enseignants et celle-ci ne peut être acquise tant que ces derniers ne se sentiront pas en mesure de les mettre en œuvre par manque de formation et de ressources. On sait cela et on sait aussi que la formation initiale et continue en histoire des sciences est souvent indigente voire inexistante. Peut-on sérieusement croire que la mise à disposition de ressources en histoire des sciences, même construites spécifiquement à partir des attendus des programmes d'enseignement, puisse suffire à un enseignant qui n'aurait pas suivi une formation minimale en histoire des sciences ? Cette question a été régulièrement soulevée, mais aujourd'hui comme hier on ne peut que constater que les cursus universitaires des professeurs de sciences ne font guère de place à des enseignements d'histoire ou d'épistémologie des sciences, que la formation au métier d'enseignant et la préparation aux concours d'enseignants n'y portent que peu d'attention, que les

concours eux-mêmes, malgré des questions orientées parfois vers des problématiques historiques ou épistémologiques, se suffisent par nécessité de réponses bien éloignées des possibles attendus. Que dire également des moyens de la formation continue ? Le rapport Bancel de 1989 et les textes de la réforme de la formation des enseignants de 2002 affirmaient que l'enseignant devait être à la fois un spécialiste de sa discipline, de son histoire et de son épistémologie. Ils servirent d'appui à bien des propositions de stages de formation continue en histoire des sciences inscrits aux plans académiques de formation (PAF). Combien de stages de ce genre figurent encore aujourd'hui dans ces catalogues de formation ? Que reste-t-il du bilan qu'établissait Danielle Fauque aux journées ReForEHST de 2006 (Fauque, 2006) ? Comment dès lors attendre d'un enseignant qu'il se forme seul, par la suite, hors de tout cadre académique garant de situations d'échanges avec un référent, avec un chercheur en histoire ou épistémologie des sciences ?

Une faiblesse récurrente des orientations des programmes d'enseignement tient au fait qu'ils n'anticipent pas les nouvelles connaissances et compétences qu'ils mettent en jeu et ne s'assurent pas avant leur publication que les enseignants concernés sont prêts pour leur mise en œuvre. Les exemples historiques sont légion, le cas de l'histoire des sciences n'est pas différent, mais il est récurrent. En 1907, lorsque Jules Tannery, alors sous-directeur de l'école normale supérieure publie le programme de 1892 de son frère décédé (Tannery, 1907), il écrit en introduction :

> Il faut bien avouer qu'aujourd'hui, comme il y a quinze ans, l'enseignement de cette histoire est impossible dans nos lycées, parce que le personnel n'est pas préparé. Il faut tout d'abord organiser la préparation. On a jugé avec raison que l'histoire de l'enseignement et des doctrines pédagogiques était indispensable à ceux qui veulent être professeurs ; elle est, aujourd'hui, admirablement exposée ; mais l'histoire de ce qu'ils auront à enseigner est-elle moins nécessaire aux futurs maîtres ? Peuvent-ils continuer d'en ignorer les grands traits ?

La formation initiale, la formation continue, la mise à disposition de ressources pour l'enseignement sont des conditions nécessaires pour envisager l'intégration d'une perspective historique et épistémologique dans

les enseignements des sciences du secondaire. Réformer les programmes d'enseignement ne peut y suffire.

Références bibliographiques

Belhoste Bruno (éd.), 1995. *Les sciences dans l'enseignement secondaire français. Tome I^er^ : 1789-1914. Textes officiels*, Paris, Institut national de recherche pédagogique/Éditions Economica.

Bensaude-Vincent Bernadette, 2005. « Paul Langevin : L'histoire des sciences comme remède à tout dogmatisme », *Revue d'histoire des sciences*, 58 (2), p. 311-328, https://doi.org/10.3406/rhs.2005.2251.

Brunold Charles, 1960. *L'enseignement scientifique du second degré. Contribution à la définition de l'esprit et des méthodes de cet enseignement*, Paris, Institut pédagogique national.

Comte Auguste, 1892. « Deuxième leçon », *in Cours de philosophie positive, Tome premier,* 5^e^ édition, Paris, Au siège de la Société positiviste.

Fauque Danielle, 1998. « La dimension historique dans l'enseignement scientifique secondaire en France », Le *Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 92 (803), p. 623-636.

Fauque Danielle, 2006. « La "longue marche" d'un enseignement de l'histoire des sciences et des techniques », *Tréma*, 26, p. 34-47, https://doi.org/10.4000/trema.83.

Fortoul Hippolyte, 1854. « Instruction générale sur l'exécution du plan d'études des lycées », *Bulletin administratif de l'instruction publique*, 5 (59), p. 339-461, https://education.persee.fr/doc/baip_1254-0714_1854_num_5_59_1141 (consulté le 28/02/2023).

Gispert Hélène, 2006. « Place de l'histoire des sciences et des techniques dans les enseignements et la recherche universitaires : états des lieux et enjeux », *Tréma*, 26, p. 5-10, https://doi.org/10.4000/trema.71.

Hulin Nicole, 1984. « L'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique. Aperçu historique », *Revue française de pédagogie*, 66, p. 15-27, https://doi.org/10.3406/rfp.1984.1578.

Hulin Nicole, 1989. *L'organisation de l'enseignement des sciences. La voie ouverte par le Second Empire*, Paris, Éditions du CTHS.

Hulin Nicole, 1996. « Histoire des sciences et enseignement scientifique », *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 90 (786), p. 1201-1243.

Hulin Nicole (dir.), 2002. *Sciences naturelles et formation de l'esprit. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902. Études et documents*, Villeneuve d'Ascq, Presses universitaires du Septentrion.

Hulin Nicole, 2005. « Histoire des sciences et enseignement scientifique au lycée sous la Troisième République », *Revue d'histoire des sciences*, 58 (2), p. 389-405, https://doi.org/10.3406/rhs.2005.2254.

Langevin Paul, 1926. « La valeur éducative de l'histoire des sciences », *Bulletin de la Société française de pédagogie*, 22, p. 692-700.

Lebon Ernest, 1903. « La section des sciences au Congrès international des sciences historiques », *Revue générale des sciences*, 14, p. 590-591.

Mangin Louis, 1905. « L'enseignement des sciences naturelles dans le second cycle de l'enseignement secondaire », *in* F. Le Dantec, L. Mangin, F. Péchoutre, E. Caustier, P. Vidal de La Blache, L. Gallois & P. Dupuy, *L'enseignement des sciences naturelles et de la géographie. Conférences du Musée pédagogique*, Paris, Imprimerie nationale, p. 21-35.

Pineau-Gonord François, 2011. « Une tentative d'intégration de l'histoire des sciences à l'enseignement moderne. Le programme d'histoire des sciences de Paul Tannery et sa mise en œuvre dans l'Histoire générale du IVe siècle à nos jours de Lavisse à Raimbaud », https://www.academia.edu/40367833 (consulté le 12/03/2024).

Poincaré Henri, [1908] 1920. *Science et méthode*, Paris, Flammarion.

Rosmorduc Jean éd., 1975. *Le retour aux sources. Pour l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique français*, Brest, Université de Bretagne occidentale.

Savaton Pierre, 2011. « Histoire des sciences et enseignement du modèle de la tectonique des plaques », *RDST. Recherche en didactique des sciences et des technologies*, 3, p. 107-126, https://doi.org/10.4000/rdst.394.

Tannery Paul, 1903. « L'histoire des sciences au Congrès de Rome de 1903 », *Revue internationale de l'enseignement*, 46, p. 202-207.

Tannery Paul, 1907. « Programme d'un cours d'histoire des sciences », *La Revue du mois*, 3 (16), p. 385-391.

Recherche en didactique et histoire des sciences

Des origines aux développements actuels

Cécile de Hosson

Aux premières heures de son émergence, à la fin des années 1970, la recherche en didactique des sciences française a formé le projet de rapprocher certains raisonnements d'élèves et d'étudiant·es avec des théories ayant prévalu dans l'histoire des idées. Si ce projet n'a plus vraiment court aujourd'hui, il n'en demeure pas moins que l'histoire des sciences occupe encore une large place dans les recherches contemporaines en éducation scientifique. Dans ce chapitre, nous commençons par présenter les raisons probables, les limites et le caractère potentiellement heuristique de la mise en évidence de ressemblances entre raisonnements individuels et savoirs historiques. Nous présentons ensuite les contours d'une approche théorique et méthodologique pour l'exploration du matériau historique dans une perspective didactique. Nous faisons émerger la légitimité d'une lecture didactique des sources historiques en définissant les termes d'un processus d'élaboration de séquences d'enseignement fondées sur l'histoire des sciences nommées ici « reconstructions didactiques ». Ces reconstructions peuvent être vues comme le produit d'un travail de sélection et d'organisation d'éléments historiques opéré par le chercheur ou la chercheuse en didactique et contraint, notamment, par ce qu'il ou elle sait des difficultés des étudiant·es et par les objectifs d'apprentissage qu'il ou elle se fixe. On illustrera le propos à travers trois exemples.

Mots-clés : histoire des sciences, didactique des sciences, reconstructions didactiques

C'est à la fin des années 1970 qu'apparaissent, en France, les premières recherches en didactique de la physique. Dans sa thèse, soutenue en 1977 (et publiée en 1979), la physicienne Laurence Viennot met au jour les raisonnements « spontanés » d'étudiant·es de physique en premier cycle

universitaire confronté·es à des situations relevant de la dynamique élémentaire. Elle montre qu'il existe une tendance prononcée de la pensée à associer force et mouvement, à imaginer que, si un objet se déplace dans une direction donnée, c'est qu'une force dirigée dans le sens du mouvement s'applique nécessairement sur l'objet[1]. Elle montre également que la généralité des raisonnements étudiés s'étend bien au-delà du contexte universitaire (ou scolaire), en ce qu'elle englobe également les difficultés rencontrées par nos ancêtres. En droite ligne de ce résultat, plusieurs travaux de recherche formeront le projet de rapprocher certains raisonnements d'élèves et d'étudiant·es avec des théories ayant prévalu dans l'histoire des idées. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux de Laurence Maurines (1986, 2001) sur les ondes mécaniques et lumineuses ou ceux d'Abdelmajid Benseghir (1989) en électrocinétique. Pourquoi la recherche en didactique de la physique (et avec elle, celle de la biologie), dans ses premières heures, s'est-elle mise en quête de confronter les raisonnements des élèves et/ou des étudiant·es avec ceux de savants anciens ? Quels intérêts y a-t-elle trouvés ? Ces questions, loin d'être nouvelles, irriguent la réflexion de la communauté scientifique (celle des chercheurs ou chercheuses en didactique, mais aussi des historien·nes et des philosophes des sciences) depuis la deuxième moitié des années 1980 et nous invitons le lecteur curieux à revenir, par exemple, aux articles publiés dans les numéros thématiques des revues francophones *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales* (1987) et *Recherches en didactique des sciences et des technologies* (Hosson & Schneeberger dir., 2011), qui tour à tour discutent et illustrent la pertinence de tels rapprochements tout autant que leur genèse[2]. C'est donc sur ces travaux, mais

---

[1] Il est en effet assez contre-intuitif de penser que, lorsqu'un objet est animé d'un mouvement rectiligne et uniforme, alors il n'est soumis à aucune force extérieure (ou encore, ce qui revient au même, que l'ensemble des forces extérieures exercées sur l'objet se compensent). Il est sans doute plus contre-intuitif encore d'admettre que, dans le cas de mouvements rectilignes décélérés, la résultante des forces extérieures exercées sur l'objet en mouvement est de sens opposé au mouvement.

[2] Précisons que rapprocher raisonnements des anciens et ceux des élèves contemporain·es est une manière particulière de concevoir l'utilisation de l'histoire des sciences à des fins didactiques, mais elle n'est évidemment pas la seule.

aussi sur ceux que nous conduisons depuis 2001 (date à laquelle débute notre thèse), que se fonde le propos que nous entreprenons de développer dans ce chapitre. Nous exposerons dans un premier temps les raisons probables à l'origine des quêtes de similitudes de raisonnements entre savants du passé et étudiant·es/élèves d'aujourd'hui, tout en en discutant la pertinence. Nous poserons dans un second temps quelques jalons théoriques pour penser l'exégèse historique de manière didactique.

Recherche en didactique et histoire des sciences : des similitudes en question

Il n'y a pas grand risque à affirmer que l'émergence de la recherche en didactique de la physique doit beaucoup à la psychologie génétique, en particulier aux travaux de Jean Piaget et de ses collaborateurs. L'idée selon laquelle l'individu construit ses connaissances avec et contre celles qu'il possède déjà, importée (notamment) de l'école piagétienne, constitue le socle fondateur de l'entreprise didactique et ce n'est peut-être pas tout à fait un hasard si la première thèse en didactique de la physique (Viennot, 1979) s'inscrit dans le champ de la mécanique. Plusieurs recherches en psychologie du développement avaient ouvert la voie à l'exploration des comportements d'enfants et d'adolescent·es confronté·es à des situations relevant de la physique du mouvement. On pense aux travaux de Piaget (1950), mais également à ceux de Lucie Leboutet qui plaçait dans sa thèse (1969) les concepts de la mécanique élémentaire au cœur de son enquête psychologique.

Dans un article de 1985, Édith Saltiel et Viennot étudient l'intérêt de la comparaison des théories de l'*impetus* du VI^e^ au XVII^e^ siècle avec les idées d'étudiant·es de lycée et d'université face à des questions de cinématique et de dynamique[3]. Elles montrent que lorsque l'on

[3] Le concept d'*impetus* émerge de la volonté des savants prégaliléens de trouver une cause au mouvement des corps. Selon Jean Buridan, lorsqu'une chose est mise en mouvement, une qualité de mouvement est imprimée (*imprimit*) dans le mobile par le moteur. Cette qualité est permanente dans l'objet et y demeure tant qu'elle n'est pas corrompue : « Il me semble qu'il faudrait dire que le moteur, en déplaçant un corps en mouvement, imprime (*imprimit*) en lui une certaine impulsion (*impetus*) ou une certaine force motrice (*vis motiva*) du corps en mouvement, [laquelle impulsion agit]

demande à un·e étudiant·e de commenter le lancer d'un objet, il fournit fréquemment une interprétation où la notion d'élan stocké dans l'objet joue à peu près le même rôle que l'*impetus* : le mouvement implique une cause et lorsque c'est nécessaire, cette cause peut être recherchée à l'intérieur de l'objet en mouvement. Piaget et son collaborateur Rolando Garcia ne montrent pas autre chose lorsqu'ils écrivent :

> En un cas particulier, qui est celui de l'évolution de la physique entre celle d'Aristote (y compris) et celle des dernières périodes prénewtoniennes, il nous a été possible d'établir une correspondance, et même étroite, entre les quatre phases historiques (les deux moteurs aristotéliciens, le recours au seul moteur externe, la découverte de l'*impetus* puis celle de l'accélération) et les quatre étapes de la psychogenèse. On observe en particulier une construction et une généralisation frappantes vers sept-huit ans de l'idée « d'élan » en analogie surprenante avec les conceptions de Buridan. En un tel cas le parallélisme entre l'évolution des notions au cours de l'histoire et au sein du développement psychogénétique porte sur le contenu même des notions successives, et cela est compréhensible puisqu'il s'agit de concepts en quelque sorte préscientifiques. (Piaget & Garcia, 1983 : 39)

Tout en reconnaissant l'existence de traits de ressemblances entre les théories de la mécanique prénewtonienne et les idées des étudiant·es, Saltiel et Viennot (1985) pointent qu'il s'agit davantage de traits de surface que d'analogies strictes. Elles remarquent en particulier qu'influencé par les théories aristotéliciennes, Tycho Brahe distingue deux types de mouvements, l'un naturel et l'autre violent, et refuse de combiner deux *impetus*. Ce qui pouvait représenter un obstacle

---

dans la direction vers laquelle le moteur déplaçait le corps en mouvement, soit vers le haut ou vers le bas, soit latéralement, soit circulairement. Et dans la mesure où le moteur déplace ce corps en mouvement plus rapidement, dans la même mesure il lui imprime une impulsion plus forte. C'est par cette impulsion que la pierre est déplacée après que le lanceur a cessé de bouger. Mais cet élan est continuellement diminué (*remittitur*) par la résistance de l'air et par la pesanteur de la pierre, qui l'incline dans une direction contraire à celle dans laquelle l'élan était naturellement prédisposé à la déplacer » (Buridan, cité par Clagett transl., 1974 – notre traduction).

au XVII^e^ siècle n'en est plus un pour les étudiant·es d'aujourd'hui, qui font coexister sans état d'âme différentes forces à l'intérieur d'un même objet en mouvement. La distinction aristotélicienne des mouvements n'a plus vraiment de sens pour la pensée actuelle. Les autrices développent ensuite un autre exemple qui montre sans équivoque les limites des parallélismes historico-psychogénétiques. C'est un fait, les étudiant·es et les savants du XVII^e^ siècle reconnaissent de façon similaire qu'un objet lancé en l'air reçoit, de la part du lanceur, une « force », un *impetus*, qu'il conserve pendant le temps où il demeure en mouvement. Reconnaître qu'il existe une transmission de l'*impetus* permet aux savants prénewtoniens de prévoir qu'un objet lâché d'un support mobile conserve le mouvement du support. Pour Giordano Bruno, pour Galilée, il ne fait aucun doute qu'une pierre lâchée du haut du mât d'un navire en mouvement uniforme tombera au pied de celui-ci. En revanche, la majorité des étudiant·es déclare qu'un objet lancé verticalement par un personnage immobile sur un tapis roulant, tombe derrière le lanceur. Cette fois, et contrairement à la démarche historique qui demeure cohérente dans son utilisation de l'*impetus*, les étudiant·es privilégient un raisonnement dans lequel prévaut la disparition du lien physique entre le mobile et son support, plutôt qu'un raisonnement en terme d'*impetus*. Dans ce cas, le « capital de force » qui aurait dû se manifester pour l'objet entraîné dans les mains du lanceur semble disparaître dès que l'objet est lâché[4].

Toutes ressemblances entre des idées historiques et des idées d'étudiant·es contemporain·es sont-elles à placer au rang des coïncidences ? Peut-être pas… En 1938 paraît *La formation de l'esprit*

---

[4] Piaget et Garcia prendront eux-mêmes leurs distances avec la thèse du parallélisme : « Il n'est, cela va de soi, pas le moins du monde question d'invoquer ici un parallélisme onto-phylogénétique au sens de Haeckel et cela pour trois raisons, toutes trois évidentes : a) on ne connaît pas d'exemple de transmission héréditaire des idées ; b) il n'y a pas de filiation héréditaire entre Aristote ou Buridan, par exemple, et les petits Genevois et Polonais qui nous ont servi de sujets ; c) mais surtout, l'enfant est antérieur à tous les adultes de l'histoire, puisqu'ils ont tous commencé par être des enfants » (Piaget et Garcia, 1983 : 80-81). Pour une critique plus poussée de la pertinence des rapprochements entre histoire des sciences et psychogenèse, nous renvoyons le lecteur à l'article de Daniel Raichvarg (1987).

scientifique, ouvrage dans lequel le philosophe Gaston Bachelard présente son concept « d'obstacle épistémologique » qui peut être étudié dans le développement historique de la pensée scientifique et dans la pratique de l'éducation (Bachelard, 1938). Entre le désir de connaître et les concepts propres à la science se dresse le mur de « l'opinion », des « connaissances mal faites » portées par des raisonnements qui entravent la formation de l'esprit scientifique. L'expérience première, la pensée animiste, les raisonnements substantialistes sont autant d'obstacles à franchir pour qui (savant ou élève) souhaite accéder à la rationalité scientifique. Le concept d'obstacle épistémologique acquiert sa robustesse par son caractère universel, par le fait qu'il est indissociable de la construction des connaissances scientifiques aux niveaux individuels et historiques. Même en adoptant un point de vue moins radical – nous rejoignons Viennot lorsqu'elle souligne que, si beaucoup d'idées communes sont des obstacles potentiels, « il faut aussi envisager que certaines puissent constituer un appui dans l'accès à la connaissance » (Viennot, 1996 : 23) – et en faisant preuve de prudence, on peut toutefois avancer que certaines tendances de la pensée dite « commune » viennent compliquer la construction des connaissances scientifiques : substantialiser la chaleur, le courant électrique, les images optiques conduit souvent à interpréter de manière erronée les phénomènes impliquant ces concepts. Certes, il n'est nullement nécessaire de se plonger dans l'histoire pour dégager ce qui, chez les élèves, les étudiant·es, risque d'entraver le développement de la pensée scientifique (d'ailleurs, la plupart des travaux de recherche sur les conceptions des élèves et des étudiant·es se sont développés indépendamment de toute préoccupation historique ; la mise au jour de ressemblances, lorsqu'elle existe, intervient le plus souvent en deuxième intention). Mais savoir qu'il existe des modes de pensée universels et cohérents susceptibles de bloquer ou, *a minima*, de parasiter la construction des connaissances scientifiques permet de considérer les erreurs des élèves, des étudiant·es autrement que comme le résultat d'un manque de travail ou d'un enseignement défaillant. On peut également admettre, comme le font Saltiel et Viennot (1985), que le temps d'installation d'un concept, d'une loi dans le *corpus* des savoirs

scientifiques est un bon indicateur des difficultés que risque de rencontrer l'individu au cours de sa formation. S'il a fallu vingt siècles pour que la lumière soit reconnue, dans la communauté savante, comme le *stimulus* de la vue, on peut légitimement questionner l'efficacité d'un enseignement qui, pour ce savoir, ne prendrait que quelques heures, voire, quelques minutes. La remarque vaut pour le principe d'inertie, le concept d'énergie et bien d'autres. Enfin, identifier les éléments qui, à l'échelle historique, ont contribué à l'évolution des explications peut contribuer, sous conditions, à l'édification de parcours d'apprentissage. C'est, en partie, l'objet de la suite de ce chapitre.

L'histoire des sciences, un modèle d'exposition didactique ?

En 1866 paraît le *Generelle Morphologie der Organismen,* ouvrage dans lequel Ernst Haeckel développe la théorie de la récapitulation, aussi appelée « loi biogénétique fondamentale », selon laquelle « l'ontogénie récapitule la phylogénie » ou, énoncée autrement, chaque organisme se développe en passant par les étapes des organismes ancestraux. Le développement ontogénétique humain (soit l'embryogenèse humaine) et le développement phylogénétique des espèces animales suivraient, par conséquent, une progression analogue. Cette théorie qui, est-il besoin de le préciser, n'a plus court aujourd'hui, fera toutefois autorité dans le monde savant de la fin du XIX^e^ et au début du XX^e^ siècle. Par exemple, pour démontrer la parenté de l'homme avec les organismes qui l'ont précédé dans l'ordre de la vie terrestre, l'astronome Camille Flammarion recourt à l'embryologie qui, selon lui, montre que l'homme commence son existence par un œuf et par des phases correspondant aux formes animales d'où sont issus ses ancêtres :

> L'embryologie constate que, maintenant encore, tout être humain passe, dans le sein de sa mère, par les phases animales antérieures et, qu'avant d'être humain, chacun de nous a été œuf, reptile, quadrupède. (Flammarion, 1886 : 765 ; voir Figure 1)

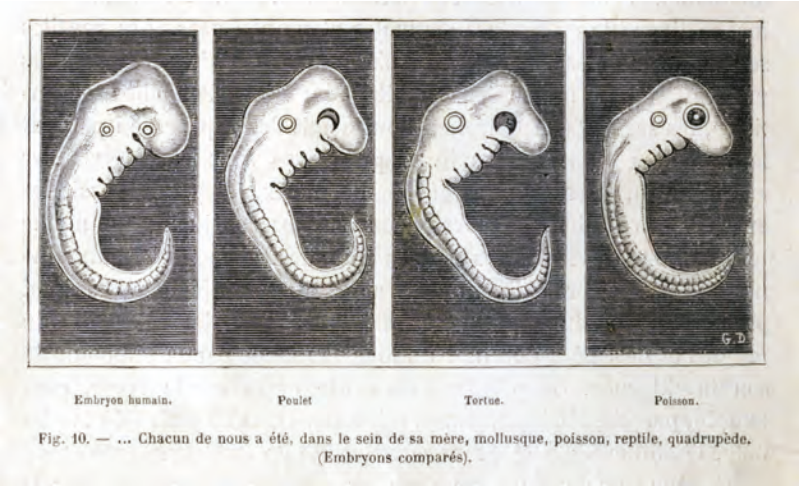


Figure 1 – « ... Chacun de nous a été, dans le sein de sa mère, mollusque, poisson, reptile, quadrupède. »

Source : gallica.bnf / BnF. Illustration extraite de Flammarion, 1886 : 24

L'embryologie ne sera pas la seule à entrer sous l'administration de la loi de la récapitulation. Pour Haeckel, outre l'évolution biologique, celle de l'esprit de l'enfant résumerait l'histoire du développement de l'esprit humain :

> C'est tout à fait de la même manière que l'admirable activité de l'homme est sortie graduellement, à travers des milliers d'années, de la grossière intelligence des vertébrés inférieurs, et **le développement psychique de chaque enfant n'est qu'une brève répétition de cette évolution phylogénétique**. (Haeckel, cité par Canguilhem, 1968 : 44 – c'est nous qui soulignons)

Il n'est pas inintéressant de remarquer ici qu'une idée relativement proche s'était fait jour un siècle plus tôt sous la plume du philosophe Nicolas de Condorcet. Dans son *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, Condorcet établit une correspondance entre le développement de l'espèce humaine et celui de l'individu :

> Si l'on suit le développement de l'espèce humaine de générations en générations, il présente alors le tableau des progrès de l'esprit humain. Ce progrès est soumis aux mêmes lois générales qui s'observent dans le développement individuel de nos facultés, puisqu'il est le résultat de ce développement, considéré en même temps dans un grand nombre d'individus en société. (Condorcet, [1795] 1988 : 80)

Très concerné par la question éducative, Condorcet prend la présidence du Comité d'instruction publique créé en 1792 par l'Assemblée nationale législative française et rédige son projet de décret sur l'organisation générale de l'instruction publique qui sera présenté à l'Assemblée nationale les 20 et 21 avril 1792. On y lit notamment :

> Nous avons donc imité dans nos distributions la marche que l'esprit humain a suivie dans ses recherches […]. Le plan que nous présentons à l'Assemblée a été combiné d'après l'examen de l'état actuel des Lumières en France et en Europe ; d'après ce que les observations de plusieurs siècles ont pu nous apprendre sur la marche de l'esprit humain dans les sciences et dans les arts[5].

La proximité intellectuelle entre l'orientation du décret de 1792 et la ligne défendue dans *L'Esquisse* ne fait guère de doute : si le développement individuel de nos facultés suit celui de l'espèce humaine, il peut sembler cohérent de projeter l'organisation de l'instruction (scientifique, notamment) sur la marche historique ; de caler la progression curriculaire sur l'histoire des progrès de l'esprit humain. Près de deux siècles plus tard, le physicien Paul Langevin, dont on connaît l'engagement pour la recherche pédagogique et pour l'éducation scientifique, écrira :

> Ce développement progressif de l'œuvre scientifique en ses trois étapes [théologique, métaphysique et positiviste – NDLR], il paraît indispensable de le respecter, de le reproduire dans l'initiation donnée à l'école en l'adaptant à chaque instant au développement intellectuel des élèves qui se poursuit, **conformément à la grande loi biologique**, suivant un rythme parallèle à celui de l'évolution de l'espèce […]. En respectant cet ordre,

---

[5] Nicolas de Condorcet, « Rapport et projet de décret relatifs à l'organisation générale de l'instruction publique », Présentation à l'Assemblée législative, 20 et 21 avril 1792, https://www.assemblee-nationale.fr/histoire/7ed.asp (consulté le 10/07/2023).

> en éclairant le pédagogique par l'historique on résoudra pour le mieux le problème de l'initiation scientifique. (Langevin, 1964 : 215 – c'est nous qui soulignons)

On aurait tort de croire que l'idée selon laquelle la chronologie historique peut influencer l'élaboration des contenus propres à l'instruction a complètement disparu. Une immersion au sein d'un groupe de physicien·nes en charge de la construction d'un enseignement de mécanique élémentaire pour le premier cycle universitaire témoigne de l'attachement de la communauté enseignante à un certain ordre historique : Galilée doit être enseigné avant Isaac Newton, Newton avant Albert Einstein et il ne saurait en être autrement[6]. On notera au passage qu'une telle vision n'autorise qu'un projet réductionniste pour l'histoire des sciences, un projet bien éloigné de ce qui fonde l'entreprise historique contemporaine. Ainsi, se dessinent les traits d'un récit épuré qui organise l'histoire des vainqueurs, une chronologie des progrès, une histoire sans aspérité, sans errance, sans contradiction, sans controverse, une histoire asociale. En résumé, une histoire qui ne rend pas compte « des processus qui sous-tendent le passage d'une connaissance à l'autre dans son dynamisme mais des caractéristiques statiques qui séparent et distinguent les connaissances les unes des autres » (Raichvarg, 1987 : 24).

Dans les lignes qui précèdent, nous avons pointé les risques que les tentatives de rapprochement entre psychogenèse et histoire des sciences faisaient courir à l'enquête historique. Réductionnisme, simplifications, juxtapositions progressistes, tels seraient les mécanismes à l'œuvre dans l'effort de recherche de traits communs entre développement individuel de la pensée et genèse historique. Sans aller jusqu'à renier la légitimité de leur démarche, Piaget et Garcia l'admettent, leur lecture de l'histoire des sciences n'est pas celle des historien·nes :

> Nous avouons avoir été conduits à réévaluer ces faits à la lumière d'une problématique surgie d' abord dans le terrain de la psychogenèse, et de là avoir procédé à une relecture de l'histoire des sciences dans une

---

6 Pourtant, on pourrait très bien enseigner la théorie de la relativité restreinte en premier et montrer que la cinématique de Galilée est un cas particulier d'une loi plus générale, dans la mesure où les étudiant·es de premier cycle ont déjà été acculturé·es à la physique du XVII^e^ siècle au lycée.

> perspective qui n'est pas celle de la plupart de ses spécialistes. (Piaget et Garcia, 1983 : 45)

Quelle est donc cette perspective ? L'histoire reconstruite par le ou la psychologue, le chercheur ou la chercheuse en didactique, en définitive par le non « spécialiste » ne peut-elle être que falsifiée, illégitime par effet d'imposture ? Disons-le d'emblée, notre réponse à cette question est non. Pourquoi ? C'est ce que nous allons voir dans un instant. Aux prémices de notre argumentation, nous sommes tentée de revenir à ces lignes du philosophe américain Thomas S. Kuhn, publiées en 1977 dans *La tension essentielle*, à propos de l'idée de causalité dans le développement de la physique :

> Quelles sont les raisons pour lesquelles un historien des sciences peut être appelé à écrire pour des psychologues de l'enfant sur un sujet tel que la causalité en physique ? L'une des premières réponses est bien évidente à tous ceux qui sont familiers des recherches de Jean Piaget. Ses remarquables travaux sur les notions d'espace, de vitesse, de temps ou sur le monde lui-même, chez l'enfant, ont constamment révélé de frappants parallèles avec les conceptions soutenues par des hommes de science d'époques précédentes. Si de telles relations existent pour la notion de causalité, leur mise en évidence doit intéresser tant le psychologue que l'historien […]. **Une partie de ce que je sais sur la manière de poser des questions à des savants disparus, je l'ai appris en examinant les interrogatoires de Piaget avec des enfants vivants**. (Kuhn, [1977] 1990 : 56 – c'est nous qui soulignons)

Lorsque nous avons enquêté sur les raisonnements des jeunes élèves à propos du rôle de la lumière dans la vision (Hosson, 2004), nous avons montré que l'entrée de la lumière dans l'œil n'est reconnue qu'au prix de la gêne qu'elle provoque, c'est-à-dire, dans des situations d'éblouissement. Or, dans de telles situations, la vision est difficile, voire impossible. Ce constat pose deux difficultés. D'abord, il conduit les élèves à affirmer que la vision des objets n'est possible que si la lumière n'entre pas dans l'œil (ce qui est précisément l'inverse de ce que dit la science : pour voir un objet, il est nécessaire que de la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil) ; ensuite, il induit l'idée que les objets ordinairement éclairés ne renvoient pas la lumière qu'ils reçoivent. En d'autres termes,

la vision d'un objet n'est possible si celui-ci est éclairé et si la lumière qui l'éclaire est suffisamment faible pour y « rester ». Nous savions dès lors que les élèves (du moins ceux que nous avions interrogés) raisonnaient de manière dichotomique : soit la lumière entre dans les yeux et je ne vois rien, soit elle ne rentre pas et je vois, et il existe un seuil en deçà duquel la lumière qui atteint un objet y reste et c'est alors que la vision de l'objet devient possible[7]. Là où l'élève raisonne en termes de « tout ou rien » par discontinuité, le ou la physicien·ne adopte une approche quantitative et continue, un « plus ou moins » qui lui permet de penser la vision comme le résultat de l'entrée dans l'œil d'une quantité suffisante de lumière : ni trop, ni trop peu. Forte de ces résultats, nous avons entrepris de rechercher ce qui, dans l'histoire des théories de la vision, avait contribué à faire de la lumière le *stimulus* de la vue. Nous formulions le pari qu'un examen de l'édification conceptuelle de la théorie physique de la vision au plan historique pourrait nous fournir des pistes susceptibles de façonner un parcours d'apprentissage. Il s'agissait donc de trouver, dans l'histoire, des leviers transférables au cheminement cognitif des élèves.

Sur le plan méthodologique, nous avons débuté notre exploration historique par l'étude d'historiographies réputées sur la lumière et la vision (Lindberg, 1976 ; Rashed, 1997 ; Ronchi, 1956 ; Simon, 2003). Cela nous a conduite à nous intéresser de plus près aux écrits du savant irakien Ibn al-Haytham (965-1040) qui, selon les historien·nes, offraient une perspective nouvelle pour l'explication de la vision (perspective qui, dans ses grands traits, est celle admise aujourd'hui). Nous avons mis de côté les récits historiographiques (qui n'apportaient pas de réponse claire à la question « Comment la lumière est-elle devenue le *stimulus* de la vue ? ») pour nous concentrer sur le *Kitab al-Manazir* d'Ibn al-Haytham dans sa traduction anglaise par Abdelhamid I. Sabra (1989). L'exégèse de cette source primaire s'est vue façonnée par la connaissance que

---

7 Nous savions également que la plupart des élèves de primaire et de collège expliquent que, si l'on voit, c'est parce que l'œil envoie « un regard », une « vision », « la vue », en d'autres termes une entité de nature assez mal définie qui, sortant de l'œil, va à la rencontre des objets (les élèves savent que, sans lumière, on ne voit rien, mais son rôle se limite à éclairer les objets et c'est tout). Notons que, si une petite partie des élèves affirme au contraire que quelque chose, partant des objets éclairés, pénètre dans l'œil de l'observateur, ce quelque chose n'est jamais de la lumière (Hosson & Kaminski, 2002).

nous avions des difficultés des élèves (on se souvient de la posture de Kuhn mentionnée plus haut) et nous a permis de construire une ressource pédagogique : le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision,* discussion fictive de type galiléenne dans laquelle trois personnages cheminent vers une explication physique du mécanisme de la vision. Le *Dialogue* s'ouvre sur une exposition de deux théories antagonistes (explicitement situées dans le contexte de la Grèce antique) : la vision résulte d'un processus impliquant soit un sens œil > objet, soit un sens objet > œil[8]. Il se poursuit par une construction progressive du concept de lumière comme *stimulus* de la vue et suit l'organisation décrite dans la partie droite de la Figure 2.

La mise en perspective des étapes conceptuelles du *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* avec les étapes d'une reconstruction historique des travaux d'Ibn al-Haytham appelle plusieurs commentaires. On remarquera d'abord que le phénomène de l'éblouissement joue un rôle pivot dans l'élaboration conceptuelle proposée par Ibn al-Haytham. À l'inverse, ce même phénomène constitue, pour les élèves, une difficulté majeure pour comprendre que la vision d'un objet résulte de l'entrée dans l'œil d'un observateur d'une partie de la lumière renvoyée par l'objet. Un même fait d'observation (l'éblouissement) conduit d'un côté à conclure que la lumière est *stimulus* de la vue et, de l'autre, à imaginer au contraire que lorsque la lumière entre dans l'œil, la vision est impossible. Cette différence fondamentale anéantit d'emblée tout projet de construction d'un cheminement conceptuel pour les élèves qui suivrait une voie strictement parallèle au cheminement historique (ici, celui du *Kitab al-Manazir*). De fait, le *Dialogue,* né d'un double travail d'enquête didactique et historique, procède d'une organisation spécifique à la classe et diffère du référent historique, dans la mesure où nous avons ajouté des éléments dont la présence nous semblait nécessaire à un cheminement intellectuel vertueux (unité de fonctionnement des cinq sens, analogie entre la vision et l'ouïe)[9]. Reste que l'analogie entre les effets de la lumière et la douleur, marchepied vers

---

[8] À ce stade, nous avons fait l'hypothèse que les élèves allaient reconnaître leurs propres idées dans celles des Anciens et adhérer ainsi au parcours cognitif proposé par le *Dialogue* en prenant parti pour l'une ou l'autre théorie.

[9] De fait, l'utilisation de ce dialogue s'est avérée fructueuse en termes d'apprentissage (et de motivation), aussi bien dans le contexte d'entretiens d'apprentissage avec des

un traitement quantitatif de la lumière, demeure l'élément pivot des deux cheminements et, ce qui est intéressant, c'est que cet élément apparaissait jusqu'alors minoré, voire ignoré, par les historien·nes[10]. On voit là non seulement la pertinence de la mobilisation de résultats didactiques pour l'analyse historique, mais également la nécessité, pour le chercheur ou la chercheuse en didactique, d'un retour vers les sources historiques primaires.

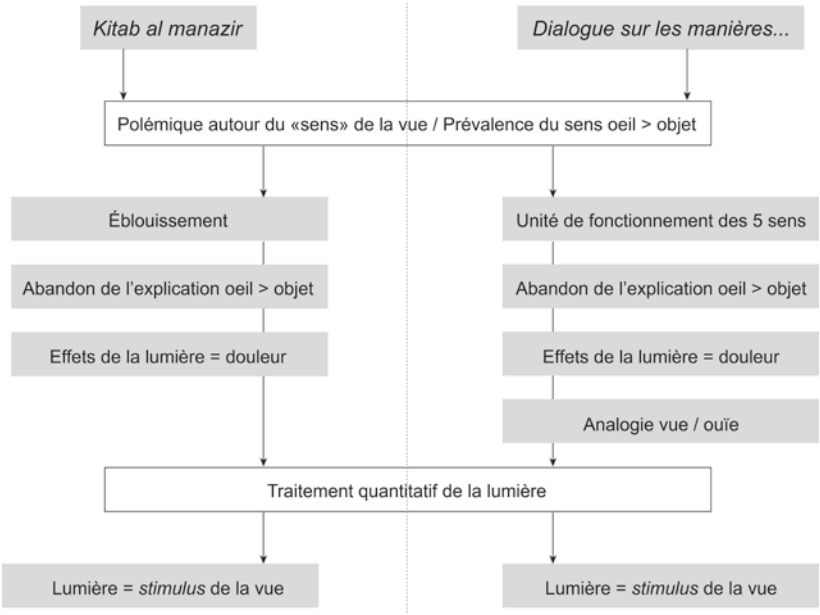


Figure 2 – Organigramme mettant en perspective les étapes conceptuelles du *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* avec les étapes d'une reconstruction historique des travaux d'Ibn al-Haytham pilotée par les résultats d'une enquête didactique portant sur les idées des élèves à propos de la vision.

Source : Réalisation de l'autrice.

binômes d'élèves que dans celui de situations réelles de classe de collège et de primaire (Hosson & Kaminski, 2007).

[10] Les situations d'éblouissement et les prémices d'un traitement quantitatif de la lumière chez Ibn al-Haytham sont toutefois bien mises en évidence dans le travail historiographique de Vasco Ronchi (1956).

Interrogée comme élément de la transposition didactique (Verret, 1975), la légitimité des écarts entre le cheminement d'Ibn al-Haytham et l'organisation du *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* apparaît largement justifiée. En effet, puisque l'étude et la prise en compte des contraintes propres au monde scolaire fondent la spécificité du projet de construction didactique et, par là même, celle de l'organisation des savoirs scolaires, il n'est pas étonnant que celle-ci se présente sous une forme quelque peu différente de l'organisation historique de référence. Dans le cas du *Dialogue*, les processus ayant conduit à l'élaboration des savoirs ne sont pas gommés, mais réexaminés et complétés à la lumière des difficultés des élèves. Par ailleurs, le *Dialogue* n'aurait certainement pas vu le jour sans l'adossement à une enquête historique rigoureuse et immergée dans les textes sources.

Cette modalité de travail apparaît très différente de celle qui semble en général gouverner l'élaboration de séquences d'enseignement produites au sein de la sphère scolaire et qui entendent immerger les élèves dans le contexte historique d'une découverte. L'analyse des différentes formes scolaires prises par l'activité de mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Ératosthène » vient illustrer cette affirmation. Une analyse des huit manuels d'enseignement scientifique pour la classe de première (programmes français de 2019) révèle d'importantes contre-vérités historiques, ce qui, dans un contexte où l'on attend de l'histoire des sciences qu'elle contribue, par exemple, à l'enrichissement culturel des élèves, pose question (Décamp & Hosson, 2020)[11]. En outre, les apprentissages sous-tendus par les tâches proposées par ces manuels sont à la fois peu nombreux et peu adaptés aux difficultés associées à la compréhension des principes géométriques qui fondent la mesure.

Le chercheur ou la chercheuse en didactique dispose des moyens pour « rectifier le tir », pour redonner à l'histoire des sciences sa juste place dans l'enseignement. Comment ? En assumant d'abord le fait qu'une enquête historique ne peut être ni impartiale ni exhaustive. Même l'historien·ne

[11] À titre d'exemple, la plupart des manuels mettent en perspective la procédure de mesure d'Ératosthène avec celle supposément mise en œuvre par Anaxagore (sous l'autorité d'un modèle de Terre plate et de Soleil « proche ») dont il n'existe pourtant à ce jour aucune trace historique.

reconstruit le passé, opère des choix dans le matériau exploité dans le cadre de sa recherche :

> Les reconstructions historiques [sont] toujours incertaines […]. De plus, elles sont toujours partielles. L'historien ne raconte pas tout ce qu'il sait ou pourrait savoir mais ce qui est important […]. L'histoire de l'historien est donc l'effet d'un choix. (Koyré, 1966 : 391)

Par conséquent, les éléments historiques retenus par le ou la didacticien·ne, ainsi que la façon dont celui-ci ou celle-ci choisit de les organiser peuvent conduire à des reconstructions différentes de celles proposées par les historien·nes des sciences. Les motivations étant, de part et d'autre, spécifiques, elles induisent des lectures particulières dont la légitimité est garantie, non par une éventuelle proximité avec un parcours idéal (qui reste de toute façon inaccessible), mais par la « fécondité » (Berthelot, 2002 : 234) du programme qui les sous-tend :

> Il n'y a donc pas de lecture plus vraie ou plus fausse [de l'histoire des sciences – NDLR] ; pas davantage de lecture neutre ou de lecture n'impliquant pas de décision préalable, dans la définition de l'aire des événements retenus (notamment dans l'approche événementielle) ou dans celle des matériaux, des entités, des mécanismes reconnus comme pertinents. À chaque fois, un principe de sélection s'applique, relevant, en dernière analyse, du programme adopté. Chaque récit, chaque reconstruction, chaque modélisation est donc une stylisation, ordonnée à un principe de lecture déterminé. Ce principe de lecture est l'effet d'un programme, c'est-à-dire d'une manière générique d'expliquer et de donner sens à un objet. (Berthelot 2002 : 242)

Dans cette perspective, nous admettons qu'il existe un « programme » didactique de reconstruction historique. Selon ce dernier, l'exploration historique conduite par le ou didacticien·ne est soumise à un « principe de lecture déterminé » par un projet didactique spécifique : faciliter la construction de connaissances conceptuelles, donner une vision plus juste de la nature de la science, par exemple. Il convient ensuite d'assumer le fait qu'il existe une distance entre ces reconstructions historiques et les constructions didactiques de dispositifs d'enseignement fondés sur ces reconstructions, et qui vont former, *in fine*, le matériau pédagogique à proposer aux élèves, aux étudiant·es. Il convient enfin de placer (autant que faire se peut) les textes sources au cœur de l'enquête

historique. Non pas que le travail de l'historien·ne ne soit pas utile – il peut servir de garde-fou à d'éventuels abus d'interprétation –, mais, dans la mesure où le résultat de ce travail débouche immanquablement sur des choix, certains développements qui auraient pu intéresser le ou la didacticien·ne peuvent être passés sous silence. C'est le cas, nous l'avons vu, pour l'analogie entre les effets de la lumière et la douleur, peu (pas) mentionnée par les historien·nes contemporain·es de la lumière. Un regard sur les recherches en didactique se donnant pour objet l'élaboration de séquences d'enseignement à partir de l'histoire des sciences montre que ces conditions, même si elles ne sont pas toujours explicites, se situent bien à l'arrière-plan de la réflexion didactique.

Dans un article de 2002, Hélène Merle présente l'élaboration et la réalisation d'une séquence d'enseignement se donnant pour objectif la construction, par des élèves de primaire, de la notion géométrique d'horizon. Cette séquence prend appui sur un argument développé par Aristote pour prouver la sphéricité de la Terre : la modification de l'aspect du ciel nocturne pour des observateurs se dirigeant vers le sud[12]. Elle débute par une question : « Pourquoi des observateurs situés au nord et au sud d'un même méridien ne voient pas les mêmes étoiles dans le ciel ? ». Les élèves répondent par des schémas qui laissent apparaître une ligne méridienne tantôt droite, tantôt courbe, tandis que le champ de vision de chacun des observateurs se voit figuré, dans la plupart des cas, par un cône relativement aigu. Si cette façon de géométriser l'espace visible d'un observateur rend parfaitement compte des observations décrites par Aristote, elle ne permet pas de discriminer l'idée d'une Terre plate de celle d'une Terre ronde. Cette difficulté est travaillée *via* l'élaboration d'un nouvel outil de géométrisation du champ de vision – une ligne tangente au cercle terrestre –, dont l'émergence est appuyée par une modélisation du phénomène à l'aide de maquettes en carton représentant la surface

---

12 « Ainsi les astres qui sont au-dessus de notre tête subissent un changement considérable, et ils ne nous semblent plus les mêmes, selon qu'on va au midi, ou au nord. Il y a certains astres qu'on voit en Égypte et à Chypre, et qu'on ne voit plus dans les contrées septentrionales. Certains astres, au contraire, qu'on voit constamment dans les contrées du nord, se couchent quand on les considère dans les contrées que je viens de nommer. Ceci prouve non seulement que la forme de la terre est sphérique, mais encore que sa sphère n'est pas grande ; car autrement on ne verrait pas de tels changements pour un déplacement si petit. » (Aristote, 1866 : Livre II, chap. 14, 298b)

terrestre (ou plus exactement, une portion de ligne méridienne). Ce travail nous inspire plusieurs remarques. D'abord, on constate qu'il existe une dissymétrie (non explicitement caractérisée par l'autrice) entre les hypothèses et les enjeux historiques d'une part, didactiques d'autre part : d'un point de vue historique, la notion d'horizon sert de modèle explicatif des changements d'aspects du ciel nocturne pour asseoir l'idée d'une Terre sphérique ; d'un point de vue didactique, les changements d'aspect du ciel comme manifestation de la sphéricité de la Terre permettent la construction de la notion d'horizon[13]. Pour autant, c'est bien la description empirique des changements dans le ciel nocturne proposée par Aristote, analysée à l'aune des difficultés des élèves à géométriser le champ de vision, qui inspire le problème posé aux élèves. La formulation de ce problème est l'effet d'une lecture didactique du texte d'Aristote ; sa résolution à l'aide des maquettes en carton peut être considérée comme une extrapolation expérimentale à petite échelle du modèle géométrique aristotélicien. La séquence d'enseignement élaborée par Merle émerge d'un travail de réorganisation d'éléments historiques (observation des différences de configuration du ciel nocturne entre deux points d'un même méridien, démonstration de la sphéricité de la Terre à partir de la notion d'horizon), auxquels s'adjoignent des éléments anhistoriques (utilisation de maquettes en carton). Le tout forme une reconstruction didactique féconde. Cette séquence replace les élèves dans un contexte historique (celui de la pensée d'Aristote) pour les aider à dépasser la simple affirmation « la Terre est ronde » et « parvenir à une construction argumentée et étayée de la sphéricité de la Terre » (Merle, 2002 : 133).

Cet exemple et celui développé plus haut à partir de l'histoire du mécanisme optique de la vision renvoient à des reconstructions conçues dans une large mesure dans le but de contribuer à l'élaboration de connaissances conceptuelles (ligne d'horizon, rôle de la lumière dans la vision). Mais le travail de reconstruction opéré par le chercheur ou la chercheuse en didactique peut également viser la sensibilisation des élèves, des étudiant·es à ce qui fonde l'entreprise humaine et socioculturelle de la science, à la nature des sciences :

---

[13] On précise ici que les élèves engagé·es dans la démarche proposée par Merle savent que la Terre est ronde.

> *In a review of the attempts to incorporate HOS in science teaching, it is argued that if we wish to use the history of science to influence students' understanding of science, we must treat [historical] material in ways which illuminate particular characteristics of science.* (Russel, 1981 : 56)

Là encore, un principe de sélection s'impose, porté – comme c'est le cas dans les recherches de Maurines et Daniel Beaufils en optique (2011) – par la volonté de « faire acquérir aux élèves une image de la nature des sciences comme un processus et une entreprise humaine » (Maurines & Beaufils, 2011) en leur présentant « une image plus réaliste/authentique de l'activité scientifique » pour lutter, par exemple, contre une tendance à l'hagiographie encore trop prononcée dans les manuels scolaires. Reste à trouver dans l'histoire des sciences des épisodes, des faits répondant aux critères qui permettent d'accéder à une vue plus juste de la dynamique de production des savoirs scientifiques et, de là, de reconstruire une histoire où les connaissances scientifiques seraient considérées comme le résultat d'activités réalisées par des hommes et des femmes dans le contexte socio-culturel d'une époque donnée. Il est probable que de telles reconstructions présenteraient des caractéristiques différentes de reconstructions strictement conceptuelles.

Conclusion

En ouverture de ce chapitre, nous sommes revenue sur les premiers travaux de recherche en didactique de la physique qui, en France à la fin des années 1970, ont formé le projet de rapprocher certaines conceptions d'élèves et d'étudiant·es avec des théories ayant prévalu dans l'histoire des idées. Nous avons fait émerger certaines filiations entre ces recherches pionnières et des positionnements théoriques issus de la psychologie du développement et de la philosophie des idées. Cela nous a conduite à discuter de l'influence des théories de la récapitulation qui, à la fin du XIX^e^ siècle, instituent le développement de l'esprit humain (psychogenèse) en tant que répétition de la construction historique des savoirs (ontogenèse). Nous en avons pointé les limites et les incohérences, tout en soulignant le caractère potentiellement heuristique de la mise en évidence de ressemblances entre conceptions des élèves et savoirs historiques. Nous avons ensuite présenté les contours d'une approche théorique et méthodologique pour

l'élaboration de reconstructions didactiques en tant que produits légitimes d'un travail de sélection et d'organisation d'éléments historiques opéré par le chercheur ou la chercheuse en didactique et contraint, notamment, par ce qu'il ou elle sait des difficultés des élèves, des étudiant·es et par les objectifs d'apprentissage qu'il ou elle se fixe (objectifs en termes d'apprentissage conceptuel et/ou relatifs à la Nature de la Science).

Il est une question que nous n'avons pas abordée dans notre développement et qui concerne la visibilité du matériau historique. Quelle place une reconstruction didactique inspirée de l'histoire des sciences doit-elle accorder aux textes historiques de première main ? À cette question, nous n'avons pas de réponse définitive. Rappelons, par exemple, que le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* n'est pas un document historique, que les élèves de Merle ne sont pas confrontés au texte d'Aristote, pas plus que ne le sont ceux de Maurines et Beaufils aux écrits des physiciens de la lumière du XVII^e^ siècle. Et pour autant, l'histoire est bien là, inspirante, autant pour poser des problèmes que pour fournir des clés pour les résoudre, ou encore pour donner une image plus authentique du fonctionnement de la science.

Mais il faut bien admettre que la question de l'accès aux textes historiques se pose un peu différemment selon que l'on s'adresse à des enseignant·es ou à des élèves. Notre expérience de formatrice d'enseignant·es (en formation initiale et continue) nous montre que, si les enseignant·es sont plutôt enclin·es à se plonger dans la lecture de sources primaires, ils ou elles sont en revanche beaucoup plus circonspect·es lorsqu'il s'agit de projeter l'utilisation de ces mêmes sources dans la classe. Cette attitude vis-à-vis du texte historique conduit bien souvent à des coupes franches, voire à des reformulations complètes du propos développé. Ne le nions pas, comprendre le propos d'un savant grec du IV^e^ siècle avant J.-C. ou d'un physicien anglais du XVII^e^ siècle peut en effet s'avérer particulièrement coûteux. Charge alors au ou à la didacticien·ne de proposer, par exemple, des *corpus* de textes historiques commentés, et d'accompagner les enseignant·es dans la création de matériaux pédagogiques à la fois rigoureux et accessibles. Derrière ce projet se cache la question de la formation. Mais ça, c'est une autre histoire…

Références bibliographiques

Aristote, 1866. *Traité du ciel*, Paris, A. Durand/Ladrange.

Aster. *Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 1987. « Didactique et histoire des sciences » [Dossier], 5, p. 1-174, https://www.persee.fr/issue/aster_0297-9373_1987_num_5_1 (consulté le 23/02/2023).

Bachelard Gaston, 1938. *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, J. Vrin.

Benseghir Abdelmadjid, 1989. *Transition électrostatique-électrocinétique. Point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Viennot, Université Paris 7.

Berthelot Jean-Michel, 2002. « Pour un programme sociologique non réductionniste en étude des sciences », *Revue européenne des sciences sociales,* 40 (124), p. 233-251, https://doi.org/10.4000/ress.590.

Canguilhem Georges, 1968. *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, J. Vrin.

Clagett Marshall (transl.), 1974. « Jean Buridan. The Impetus Theory of Projectile Motion», *in* E. Grant (ed.), *A Source Book in Medieval Science*, Cambridge, Harvard University Press, p. 275-280.

Condorcet Nicolas de, [1795] 1988. *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain,* Paris, GF Flammarion.

DÉcamp Nicolas & Hosson Cécile de, 2020. « Ératosthène et Anaxagore dans l'enseignement scientifique. Embûches et opportunités ». *Images des Mathématiques*, 21 mai, https://images.math.cnrs.fr/Eratosthene-et-Anaxagore-dans-l-enseignement-scientifique.html?lang=fr&id_forum=16436 (consulté le 10/07/2023).

Hosson Cécile de, 2004. *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences Élaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation*, thèse de doctorat, sous la dir. de W. Kaminski & J. Gayon, Université Paris 7.

Hosson Cécile de & Kaminski Wanda, 2002. « Les yeux des enfants sont-ils des "porte-lumière" ? », *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie,* 96 (840), p. 143-160.

Hosson Cécile de & Kaminski Wanda, 2007. « Historical Controversy as an Educational Tool: Evaluating Elements of a Teaching–Learning Sequence Conducted with the Text "Dialogue on the Ways that Vision Operates" », *International Journal of Science Education*, 29 (5), p. 617-642, https://doi.org/10.1080/09500690600802213.

Flammarion Camille, 1886. *Le monde avant la création de l'homme. Origines de la terre, origines de la vie, origines de l'humanité. Ouvrage illustré de 400 gravures sur bois, 8 cartes géologiques et 5 aquarelles*, Paris, C. Marpon et E. Flammarion.

Haeckel Ernst, 1866. *Generelle Morphologie der Organismen. Allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von Charles Darwin reformirte Descendenz-Theorie*, Berlin, G. Reimer.

Hosson Cécile de & Schneeberger Patricia (dir.), 2011. « Didactique des sciences et histoire des sciences » [Dossier], *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, p. 9-152, https://doi.org/10.4000/rdst.358.

Koyré Alexandre, 1966. *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Presses universitaires de France.

Kuhn Thomas S., [1977] 1990. *La tension essentielle. Tradition et changement dans les sciences*, Paris, Gallimard.

Langevin Paul, 1964. *La pensée et l'action*, Paris, Éditions sociales.

Leboutet Lucie, 1969. *De la notion au concept chez l'enfant et l'adolescent. Étude de psychologie génétique sur la physique élémentaire*, thèse de doctorat, Paris, Université de la Sorbonne.

Lindberg David C., 1976. *Theories of Vision from al-Kindi to Kepler*, Chicago/London, University of Chicago Press.

Maurines Laurence, 1986. *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques. Étude des difficultés des étudiants*, thèse de doctorat, sous la dir. de É. Saltiel, Université Paris 7.

Maurines Laurence, 2001. *Le raisonnement géométrique en termes d'objet dans la physique des ondes*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 11.

Maurines Laurence & Beaufils Daniel, 2011. « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies,* 3, p. 271-305, https://doi.org/10.4000/rdst.444.

Merle Hélène, 2002. « Histoire des sciences et sphéricité de la Terre : compte-rendu d'innovation », *Didaskalia*, 20, p. 115-135, https://doi.org/10.4267/2042/23917.

Piaget Jean, 1950. *Introduction à l'épistémologie génétique. Tome II : La pensée physique*, Paris, Presses universitaires de France.

Piaget Jean & Garcia Rolando, 1983. *Psychogenèse et histoire des sciences*, Paris, Flammarion.

Raichvarg Daniel, 1987. « La didactique a-t-elle raison de s'intéresser à l'histoire des sciences ? », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 5, p. 3-34, https://doi.org/10.4267/2042/9228.

Rashed Roshdi, 1997. « Al-Kindī et la tradition euclidienne en optique », *in* R. Rashed (ed.), *Œuvres philosophiques et scientifiques d'al-Kindī, Volume Ier : L'optique et la catoptrique*, Leiden/New York/Köln, E. J. Brill, p. 67-96.

Ronchi Vasco, 1956. *Histoire de la lumière*, Paris, Librairie Armand Colin.

Russell Thomas L., 1981. « What History of Science, How Much, and Why? », *Science Education*, 65 (1), p. 51-64, https://doi.org/10.1002/sce.3730650107.

Sabra Abdelhamid I. (transl.), 1989. *The Optics of Ibn al-Haytham. Books I, II, II: On Direct Vision*, London, The Warburg Institute/University of London.

Saltiel Édith. & Viennot Laurence, 1985. « What Do We Learn from Similarities between Historical Ideas and the Spontaneous Reasoning of Students? », *in* P. Lijnse (ed.), *The Many Faces of Teaching and Learning Mechanics in Secondary end Early tertiary education, Proceedings of the Conference on Physics Education, Utrecht – The Netherlands, 20-25 August 1984*, Utrecht, Groupe international de recherche sur l'enseignement de la physique (GIREP)/W.C.C.

Simon Gérard, 2003. *Archéologie de la vision. L'optique, le corps, la peinture*, Paris, Éditions du Seuil.

Verret Michel, 1975. *Le temps des études*, Lille, Atelier national de reproduction des thèses.

Viennot Laurence, 1979. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris, Hermann.

Viennot Laurence, 1996. *Raisonner en physique. La part du sens commun*, Paris/Bruxelles, De Boeck Université.

Introduire l'histoire des sciences en classe pour travailler les représentations de la/des science(s)

La transition géo-héliocentrique selon une approche anthropologique des pratiques scientifiques

Laurence Maurines

Nous présentons la démarche didactique à orientation curriculaire que nous avons suivie afin d'élaborer et expérimenter des « investigations documentaires historiques » visant à transmettre aux élèves une image plus authentique des sciences, puis le cadre théorique multidimensionnel adopté pour caractériser ces dernières. Nous montrons comment cette caractérisation, qui articule pratiques sociales, psychologie et anthropologie, peut être mobilisée pour élaborer et évaluer des dispositifs d'enseignement originaux sur l'exemple d'une séquence d'enseignement sur la transition géocentrique à héliocentrique. Conçue pour la classe de terminale scientifique, elle repose sur sept textes rédigés afin de mettre en valeur l'existence et l'évolution de présupposés au sein de la physique, et sur trois questionnaires. Les résultats obtenus avant enseignement confirment les hypothèses faites concernant les représentations de l'observation comme « neutre » et d'une démarche inductive. Après enseignement, ils montrent une vision des pratiques donnant un rôle plus grand aux dimensions humaine et sociale des sciences, ainsi qu'une évolution de la place de l'observation dans la démarche scientifique. Nous concluons en discutant des problèmes soulevés par l'expérimentation et l'introduction de l'histoire des sciences en classe.

Mots-clés : terminale scientifique, transition géo-héliocentrique, *Nature of Science (NoS)*, observation, présupposés

Pour faire face aux nombreux défis que le monde contemporain doit relever, il est attendu de l'enseignement de sciences qu'il favorise et soutienne l'orientation vers les métiers scientifiques, ainsi que l'acquisition par tout citoyen d'une

culture scientifique. Cette culture est conçue comme devant reposer sur des connaissances, non seulement en sciences, mais aussi sur ce que sont la/les science(s)[1], ainsi que sur la capacité à les utiliser pour penser ou agir de manière responsable dans des contextes variés pouvant mettre en jeu des questions socio-scientifiques ou liées au multiculturalisme (Hodson, 2009).

Cette finalité épistémologique de l'enseignement des sciences est à l'origine d'un courant de recherche encore peu développé en France et désigné par *Nature of science* (*NoS*) dans le monde anglo-saxon[2]. Les travaux réalisés dans ce champ discutent, par exemple, des façons de définir la/les science(s) à des fins d'enseignement, des contenus à enseigner et des stratégies à mettre en œuvre, et caractérisent ce que pourrait être une compréhension informée des sciences. De nombreuses recherches sur les représentations qu'en ont les élèves, étudiants et enseignants montrent qu'elles sont très souvent incohérentes et éloignées d'une vision socio-constructiviste des sciences (Lederman, 2007). Elles mettent par ailleurs en avant différents leviers susceptibles de favoriser une meilleure compréhension de la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration, comme la proposition de pratiques scientifiques « authentiques » aux élèves et l'introduction d'éléments d'histoire des sciences (HS) dans les cours de sciences (Allchin, 2011).

Face à ces différents constats, nous avons débuté un programme de recherche il y a une vingtaine d'années environ visant à examiner s'il est possible de faire évoluer les représentations des sciences des élèves grâce à

---

1 Voir note 3 de l'Introduction au présent volume, p. 8.

2 C'est lors des deux principales évolutions de l'enseignement scientifique qui se sont produites après la Seconde Guerre mondiale aux États-Unis que la *NoS* est apparue comme une cible d'apprentissage (Duschl & Grandy, 2013). Dans les années 1940, l'autorisation est donnée aux anciens combattants de poursuivre des études universitaires et un cours de sciences fondé sur l'histoire des sciences (*Harvard Case Studies in History of Science*) destiné à des non-scientifiques est publié. Dans les années 1950, la *National Science Fundation* est créée et le développement de programmes d'enseignement de mathématiques et de sciences est financé. Dans les années 1980 et 1990, l'enseignement scientifique voit ses missions s'élargir et viser non plus seulement la formation de scientifiques, mais aussi l'acculturation scientifique de tout américain. Le champ de recherche de la *NoS* se développe parallèlement, la *NoS* et l'HS sont mentionnées dans les premiers « standards » qui définissent ce que les élèves doivent apprendre et savoir.

l'HS. Après avoir présenté le cadre conceptuel qui oriente ce programme sur l'HS et la *NoS*, nous l'illustrons en prenant comme exemple une recherche doctorale portant sur l'introduction d'éléments historiques sur le passage des modèles géocentrique à héliocentrique en classe de terminale scientifique (S). Après avoir présenté quelques-unes des questions de recherche explorées dans la thèse et retenues pour cette contribution, nous précisons comment la séquence d'enseignement a été élaborée et expérimentée en classe, puis donnons quelques-uns des résultats obtenus[3]. Pour conclure, nous discutons les problèmes soulevés par cette expérimentation et l'introduction d'éléments historiques en classe de sciences.

Cadre théorique

Nous précisons tout d'abord le cadre adopté pour ce programme de recherche sur l'introduction de l'HS en classe de sciences, puis nous présentons la caractérisation de la/des science(s) sur laquelle il repose.

Introduire l'histoire des sciences en classe de sciences pour travailler la NoS

Si les programmes de physique et chimie de l'enseignement secondaire français soulignent depuis longtemps l'intérêt d'introduire des éléments d'HS en classe (Fauque, 2006), ils laissent implicites les visées d'apprentissage d'une telle introduction[4]. Depuis tout aussi longtemps, des voix se sont élevées contre l'introduction de l'HS afin de faciliter l'apprentissage de contenus scientifiques. Selon Nicole Hulin (1996), Henri Bouasse en 1901 et Richard Feynman dans les années 1970-1980 soulignent, entre

---

[3] Pour les autres, le lecteur peut se référer à : Journaux, 2018 ; Journaux & Maurines, 2020.

[4] Ce n'est que depuis peu que certains programmes et documents ressources pour les enseignants explicitent une visée d'apprentissage épistémologique, sans pour autant l'opérationnaliser au travers de la mention d'objectifs précis, de thèmes historico-scientifiques à travailler et de méthodes pédagogiques à mettre en place. Il en est ainsi, par exemple, du programme d'enseignement scientifique de première générale (d'après le Bulletin officiel de l'éducation nationale [BOEN] spécial n° 1 du 22 janvier 2019 et le BOEN spécial n° 6 du 31 juillet 2020) et du programme d'enseignement scientifique de la terminale de la voie générale (BOEN spécial n° du 25 juillet 2019), ainsi que de la ressource « Valeurs de la République et enseignement de la physique-chimie au cycle 4 » (Ministère de l'Éducation nationale [MEN], mars 2016) à destination des enseignants.

autres, que des hypothèses abandonnées et des idées obsolètes pourraient être retenues par les élèves.

Par ailleurs, sur le plan de la recherche, que ce soit à l'international ou en France, des études montrent que les enseignants de sciences rencontrent des difficultés à la mise en œuvre de l'HS en classe et expriment un besoin de formation et de ressources (Henke & Höttecke, 2015 ; Beaufils, Maurines & Chapuis, 2010). De plus, même ceux pour qui la dimension épistémologique est importante tendent à la négliger en faveur de l'acquisition de savoirs et savoir-faire scientifiques (Lederman, 2007). Enfin, les manuels d'enseignement accordent peu de place à l'HS et l'image de la/des science(s) qu'ils renvoient est réductrice, voire déformée (Allchin, 2004), même si des évolutions sont perceptibles (Beaufils & Maurines, 2013).

Ces différents constats nous ont guidés, il y a une vingtaine d'années, à expliciter et à associer à l'introduction de l'HS en classe de sciences une problématique liée à un apprentissage épistémologique. Le programme de recherche que nous avons alors débuté s'est orienté vers l'élaboration de ressources pour les professeurs et l'expérimentation de séquences innovantes d'enseignement visant à transmettre une représentation plus riche et plus authentique des sciences aux élèves (Allchin, 2011). Nous supposons, entre autres, qu'une telle introduction peut contribuer à (re) motiver les élèves pour les sciences (élèves et étudiants qui se représentent la science guère que comme un ensemble de faits théoriques et expérimentaux qu'il faut retenir). Notre approche didactique de l'HS se rapproche ainsi de celle valorisée par Agustín Adúriz-Bravo (2010), Dietmar Höttecke, Andreas Henke et Falk Riess (2012). Elle n'est pas un but d'apprentissage en tant que tel. Elle est avant tout un moyen pour faire réfléchir les élèves sur les sciences et les sensibiliser aux conceptions contemporaines de l'activité scientifique. Elle diffère en cela de l'approche mobilisée dans les travaux inscrits dans la lignée de Martin Monk et Jonathan Osborne (1997) dite de la reconstruction didactique, dont l'objectif est en premier lieu l'apprentissage scientifique (Décamp & Hosson, 2012 ; Hosson & Kaminski, 2007).

Afin de répondre aux questions soulevées par une telle introduction de l'HS, nous avons inscrit notre réflexion dans une perspective curriculaire, ce qui supposait d'avoir comme points de vigilance la cohérence,

la progressivité et la complémentarité des objectifs et dispositifs d'enseignement (Lebeaume, 1999). En ce qui concerne l'élaboration et l'expérimentation d'une séquence d'enseignement donnée, il s'agissait d'expliciter et préciser les réponses à plusieurs questions (voir Tableau 1). Certaines portent sur la séquence telle qu'elle pourrait être élaborée et mise en œuvre en classe par un enseignant : quelle cohérence entre les finalités de l'enseignement des sciences (former un scientifique, former un futur citoyen) et les objectifs d'apprentissage épistémologiques retenus, les contenus proposés (scientifiques, historiques, épistémologiques), les tâches dévolues aux élèves et à l'enseignant, sans oublier les contraintes liées au contexte d'enseignement (les programmes, la classe, l'établissement) ? D'autres portent sur le suivi lié à la recherche (repose-t-il sur des questionnaires, des observations, des entretiens ?) et les contraintes liées à la recherche (entre autres celles liées à la formation de l'enseignant). D'autres encore portent sur les conditions d'élaboration et d'expérimentation de la séquence elle-même : l'enseignant est-il en mesure de mettre en œuvre un dispositif innovant au plus près des intentions didactiques ayant présidé à son élaboration par le chercheur (ingénierie didactique dite de première génération) ou a-t-il besoin d'une formation préalable ? Est-il possible de s'appuyer sur un collectif de chercheurs-enseignants pour coconstruire la séquence et l'expérimenter (ingénierie de deuxième génération) ? Cette approche qualifiée de processus symbiotique par Höttecke, Henke et Riess (2012) semble celle à privilégier car elle permet aux chercheurs de s'appuyer sur l'expérience des conditions d'enseignement des enseignants, et aux enseignants de se former et mettre en œuvre la séquence au plus près des intentions didactiques. Sous-jacentes à ces différentes questions, il y a celles liées au cadre théorique qui sous-tend l'élaboration de la séquence d'enseignement et son expérimentation. Il y a non seulement celles concernant l'apprentissage et l'enseignement, mais aussi celles qui ont trait à la *NoS* (sur quelle conceptualisation de la/des science(s) s'appuyer ?) et à l'HS (quelles ressources historiques mobiliser ? Quels éléments introduire en classe et comment ?).

<table>
<tr><th colspan="2">Contexte d'enseignement</th><th>Quel cadre théorique ?</th><th colspan="2">Contexte de recherche</th></tr>
<tr><td>Contraintes</td><td>Classe (programme, examen, élèves), établissement</td><td rowspan="3">En particulier sur la NoS ?
sur l'HS ?

Mais aussi sur l'apprentissage des sciences ?

Leur enseignement ?

La formation de l'enseignant ?</td><td>Contraintes</td><td>Enseignant (formation)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Scénario pédagogique</td><td>Finalités (formation d'un scientifique, d'un futur scientifique) ?
Objectifs d'apprentissage ?
<u>épistémologique</u>
uniquement
ou aussi
scientifique ?
Thème scientifique ?
Période historique ?
un panorama
ou un épisode ?
Contenus présentés ?</td><td>Méthodologie de recueil et d'analyse des données</td><td>Questionnaires ?
Observation
et enregistrement ?
Entretiens ?
qualitative ?
quantitative ?</td></tr>
<tr><td>Dispositif d'enseignement
Documents ?
Expériences ?
Tâches
élèves ? enseignant ?
Évaluation ?</td><td>Méthodologie d'élaboration et d'expérimentation du dispositif innovant</td><td>Élaboration + expérimentation par le chercheur ?
Élaboration chercheur + transfert et expérimentation par l'enseignant ?
Amélioration progressive ?
Co-construction (collectif chercheurs et enseignants) ?</td></tr>
</table>

Tableau 1 – Questionner l'élaboration et l'expérimentation d'une séquence d'enseignement

Source : Réalisation de l'autrice.

Nous avons commencé par préciser les contours de dispositifs d'enseignement innovants cohérent avec notre projet d'introduire l'HS à des fins épistémologiques et à élaborer des ressources dans le domaine de

l'optique (Maurines & Beaufils, 2011), certaines étant mises en œuvre en classe, d'autres y étant expérimentées dans le cadre d'une recherche doctorale (Slaïmia, 2014 ; Slaïmia & Maurines, 2017).

Tous ces dispositifs sont inscrits dans un cadre socio-constructiviste de l'apprentissage et de l'enseignement. Ils ont pour point commun de reposer sur des dossiers de documents à caractère historique à destination des élèves intégrés dans des séquences d'enseignement de type investigation documentaire. Une autre de leurs particularités est d'être centré sur un objectif épistémologique donné. Les documents sont construits pour pouvoir travailler une caractéristique déterminée de l'activité scientifique, dans le cadre d'un épisode historique particulier s'inscrivant dans le programme de la classe considérée. L'originalité de l'approche consiste à répartir l'information historique sur l'ensemble des documents : cela permet de donner suffisamment d'information pour limiter la réduction inévitable de l'image de la/des science(s), de ne pas décourager les élèves lors de la lecture, de limiter le temps consacré à l'activité. Le travail de lecture du corpus de documents est réparti sur la classe et l'extraction des informations est le plus souvent guidée par une consigne qui dépend de l'objectif épistémologique poursuivi. Il en est de même de l'activité de synthèse faite en classe, sous la direction de l'enseignant, qui vise une production-type permettant la visualisation synoptique des informations recueillies (diagramme, tableau). À notre connaissance, il n'existait aucune proposition de ressources historiques de ce type en physique-chimie lorsque ce projet d'investigation documentaire à caractère historique a été réalisé (Höttecke, Henke & Riess, 2012). De par sa nature, il relève d'un enseignement explicite de la *NoS* (Abd-El Khalick, 2013) et non d'un enseignement implicite qui mobilise l'HS sans pour autant travailler et institutionnaliser des objectifs d'apprentissage épistémologique en fin de séance au même titre que ceux d'apprentissage scientifique.

La NoS *selon une approche anthropologique des pratiques scientifiques*

Parallèlement à ce travail sur l'introduction de l'HS en classe de sciences, nous avons précisé la représentation de la/des science(s) sur laquelle il repose. Nous souscrivons à l'idée que, pour comprendre la

façon dont les scientifiques génèrent des connaissances par leur activité, une pluralité de points de vue est nécessaire. Inscrivant nos recherches dans une perspective curriculaire, nous avons fait le choix d'un cadre de référence large, susceptible d'ouvrir le champ des possibles, au niveau de l'enseignement secondaire et supérieur, pour la formation d'un futur scientifique et d'un futur citoyen.

Nos recherches mobilisent une grille multidimensionnelle d'analyse de la *NoS* que nous avons élaborée en faisant appel aux différents types d'études sur les sciences (voir Tableau 2) et en nous appuyant sur le concept de pratiques sociales de référence introduit par Jean-Louis Martinand (1986). Nous avons retenu neuf dimensions, elles-mêmes déclinables en sous-dimensions et catégories, pour interroger les sciences et en traduire la cohérence propre, les caractériser telles qu'elles sont pratiquées au sein de différentes communautés. Cinq des neuf dimensions se réfèrent à l'épistémologie « classique » et permettent de caractériser les savoirs et leurs modalités d'élaboration. Trois autres se rapportent à la sociologie et à l'HS : elles permettent de rendre compte de leur inscription dans une communauté et une société et d'appréhender leur évolution au cours du temps. Une dernière renvoie à la psychologie des sciences et permet de caractériser les individus, leurs qualités/dispositions et attitudes. Un des intérêts d'un cadre multidimensionnel d'analyse de la *NoS* est d'offrir autant de dimensions qu'il en possède et de permettre l'examen de l'image des sciences (renvoyée par les textes institutionnels, les situations d'enseignement, les propos d'étudiants ou d'enseignants), non seulement en termes de conformité avec les représentations contemporaines de l'entreprise scientifique, mais aussi en termes de richesse et de complexité. L'hypothèse sous-jacente est que le degré de richesse de la vision des pratiques scientifiques dépend du nombre et de la diversité des dimensions et caractéristiques pertinentes mobilisées, le degré de complexité dépend quant à lui de la façon dont elles sont mises en relation.

DE	**Dimensions épistémologiques**	DIMENSIONS
		Objets (Obj) : types d'objets et de problématiques
		Visées et Caractéristiques générales des sciences (présupposés et valeurs, rapports aux autres pratiques/ domaines) (Vis)
		Ressources (Res) : intellectuelles et matérielles (instruments, techniques)
		Produits (Pro) : types
		Élaboration (Ela) : modalités de construction et de validation des savoirs (activités, démarches, règles)
DSPH	**Dimensions sociologiques**	**Communauté** (Com) : caractéristiques des membres de la communauté, construction collective du savoir, relations au sein de la communauté
		Société (Soc) : impacts des sciences sur la société, impacts de la société sur les sciences
	Dimension psychologique	**Attitudes** et qualités individuelles (Att) : cognitives, affectives et conatives
	Dimension historique	**Temps** (Tps) : évolution des savoirs scientifiques, des démarches, du contexte sociétal/culturel, etc.

Tableau 2 – Les sciences comme communautés de pratiques et de personnes se comportant en scientifiques

Source : D'après Maurines *et al.*, 2013, 2021.

Comparativement aux caractérisations proposées à l'étranger par Sibel Erduran et Zoubeida R. Dagher (2014), et en cohérence avec notre choix de visées éducatives multiples, nous avons introduit deux dimensions supplémentaires pour caractériser le scientifique d'une part (dimension psychologique) et le situer historiquement d'autre part (dimension historique). Nous avons par ailleurs introduit des sous-dimensions pour tenir compte du contexte culturel et de l'arrière-plan métaphysique et ontologique des pratiques, ainsi que des normes et valeurs qui les orientent (sous-dimensions « Visées et caractéristiques générales des sciences »). Il s'agit d'une approche anthropologique des pratiques, dans la mesure où elle met au centre du questionnement l'Homme saisi dans toutes ses dimensions, dans son unité et sa diversité. Attentive à la singularité des acteurs et à leur multidimensionnalité, elle les considère comme des personnes qui agissent

en scientifiques, comme des *acting person as scientist* pour reprendre l'expression de Lisa M. Osbeck et ses collaboratrices (2013 : 29).

L'intérêt d'une approche des pratiques sociales articulée à la psychologie et à l'anthropologie est de permettre d'articuler les savoirs et les acteurs/personnes, et ainsi de conférer une inscription humaine et socio-culturelle aux savoirs scientifiques. Un autre encore est d'offrir un cadre d'analyse multidimensionnel pouvant être mis en œuvre pour caractériser non seulement les sciences, mais aussi d'autres domaines/pratiques de connaissance, et ainsi permettre de dégager leurs points communs et leurs différences. Cette approche nous semble pouvoir permettre de répondre à la visée éducative, défendue par Edgar Morin, de la nécessité de faire « connaître ce qu'est connaître » (Morin, 2000 : 2). Comme pour Marie Larochelle et Jacques Désautels (1992 : 5), il ne s'agit pas pour nous « de promouvoir la supériorité du savoir scientifique sur les autres savoirs, mais bien de le resituer au sein de la panoplie des jeux de connaissance inventés par les hommes et les femmes pour organiser, de façon viable, leurs expériences de cognition ». Nous visons ainsi une complexification épistémologique selon une approche (multi-)culturelle. Dans la lignée de William W. Cobern et Glen S. Aikenhead (1998), nous considérons l'apprentissage des sciences comme un franchissement de frontières culturelles, *a cultural border-crossing*.

La grille de lecture proposée par cette approche anthropologique des pratiques scientifiques ne dit rien de leurs caractéristiques et ouvre sur un questionnement large à leurs propos. Selon les objectifs éducatifs et de recherche poursuivis, elle est susceptible d'évoluer pour s'adapter au problème exploré, certaines dimensions et sous-dimensions pouvant être privilégiées par rapport à d'autres, et d'être couplée à des outils complémentaires d'analyse, tels que les schémas proposés par les didacticiens pour rendre compte des démarches scientifiques ou de la modélisation.

La recherche doctorale que nous détaillons ci-après s'appuie ainsi non seulement sur la grille de la *NoS* présentée en tableau 1, mais aussi sur le schéma de la modélisation proposé par Maurines (2010) dans son étude sur l'enseignement des sciences face au fait religieux (voir Figure 1). Souscrivant à l'idée que, si le paradigme oriente l'activité d'une communauté et la cimente, il n'en existe pas moins des différences entre scientifiques et diverses qualités de consensus, en particulier à propos de la composante métaphysique (Kuhn, 1982), Maurines

propose un schéma explicitant cette composante métaphysique du paradigme et l'existence d'un noyau commun de présupposés fondant la pratique scientifique. Ce schéma vise ainsi à montrer que l'activité de modélisation repose sur des présupposés et valeurs, c'est-à-dire des critères de positionnement théorique et de choix, plus ou moins partagés et explicités. Certains sont partagés par les scientifiques à une époque donnée et stables dans le temps (par exemple le principe du matérialisme méthodologique), d'autres sont interprétés différemment, remodelés et redéfinis (par exemple les éléments qualifiés d'auto-explicatifs par Stephen Toulmin [1973]). Ce schéma « se décline différemment selon le domaine de recherche auquel on s'intéresse et les phénomènes que l'on cherche à interpréter, selon qu'il se rapporte à une communauté donnée ou à un scientifique particulier […] » (Maurines, 2010 : 359). Il peut ainsi faire l'objet de deux niveaux d'analyse, celui d'un scientifique, un individu considéré comme une personne, et celui d'une communauté scientifique donnée, l'institution, ce qui résonne avec les propos de Yves Gingras (2016 : 15) dans son introduction à l'analyse du processus historique de séparation des institutions scientifique et religieuse : « Sur le plan méthodologique, on doit donc d'abord déterminer les échelles d'analyse. »

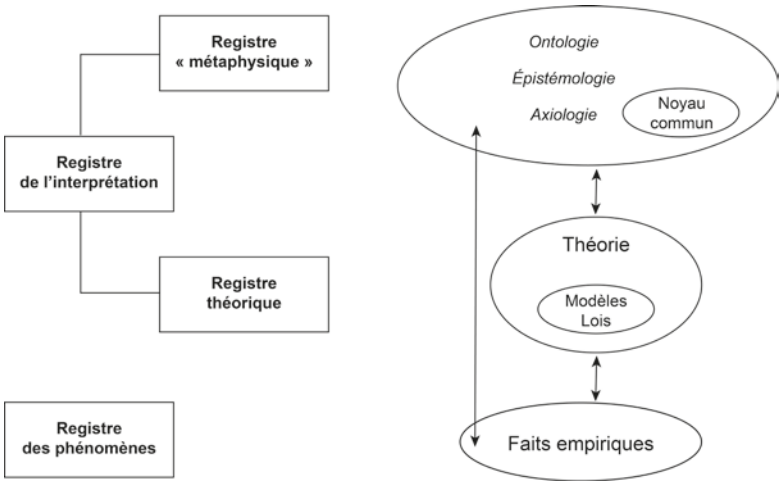


Figure 1 – Schéma de la modélisation fondée sur des présupposés

Source : Maurines, 2010.

À quelle histoire des sciences se référer ? Quels éléments introduire en classe et pour quels objectifs ?

La définition d'un dispositif d'enseignement à visée d'apprentissage épistémologique tout comme celle d'un dispositif d'enseignement à visée d'apprentissage scientifique nécessitent d'interroger les choix d'objectifs, de contenus et de modalités d'enseignement, ainsi que d'évaluation de cet enseignement.

Parmi l'ensemble des objectifs qu'une analyse épistémologique permet de dégager, nous avons choisi de retenir, dans la lignée de la proposition des objectifs-obstacles de Martinand, ceux qui sont associés à des difficultés pour les élèves. La littérature sur les représentations de la/des science(s) des élèves, étudiants et enseignants est abondante. De nombreuses études ont été réalisées à travers le monde, en abordant les sciences soit sous un angle large, soit en explorant un point spécifique (démarche, modèle, etc.). Cette littérature est une aide pour permettre la définition d'objectifs précis et le choix d'un thème historico-scientifique pouvant être abordés dans le cadre du programme d'une classe. Nous avons ainsi choisi de retenir pour les dossiers que nous avons élaborés dans le domaine de l'optique et évoqués plus haut (Maurines & Beaufils, 2011 ; Slaïmia, 2014 ; Slaïmia & Maurines, 2017), par exemple, le fait qu'un scientifique ne travaille pas seul (loi de la réfraction en classe de seconde), ou qu'il y a une interaction entre avancées des techniques et des savoirs scientifiques (les télescopes et spectroscopes en classe de terminale S).

Les éléments historiques introduits en classe relèvent d'un processus de transposition didactique[5] de l'HS. Se pose tout d'abord la question du choix des ressources historiques auxquelles faire appel, question liée à celle de la pratique sociale de référence (Martinand, 1986), autrement dit du courant de recherches en HS dans lesquelles elles s'inscrivent. En fonction des objectifs d'enseignement, tel ou tel type d'HS (conceptuelle, technique, sociale, institutionnelle, etc.) est privilégié. Se pose ensuite la question des éléments

[5] Le concept de transposition didactique (des savoirs) introduit par Yves Chevallard (1985) permet de rendre compte du processus de conception, de mise en œuvre et de réception d'un programme d'enseignement depuis le niveau institutionnel jusqu'à celui de l'élève. Le concept de pratiques sociales de référence introduit par Martinand permet d'expliciter et préciser la référence à partir duquel le programme d'enseignement est conçu, tout en élargissant l'objet de la transposition (les pratiques et non seulement les savoirs). Celle-ci peut être académique ou professionnelle, relever de la vie quotidienne, sociétale.

historiques à sélectionner et à introduire en classe, sachant qu'ils doivent permettre de travailler un objectif d'apprentissage précis dans un contexte d'enseignement donné. Comme il s'agit pour nous de proposer aux élèves des textes qu'ils peuvent exploiter sans trop de difficultés, nous avons le plus souvent proposé des extraits d'écrits secondaires ou rédigés nous-mêmes des textes[6].

Après la présentation des grandes lignes du cadre théorique qui sous-tend notre programme de recherche sur l'introduction de l'HS dans l'enseignement, nous explicitons à présent comment il a été décliné dans le travail réalisé par Journaux (2018), en mettant l'accent sur les outils d'analyse mobilisés et certains des résultats obtenus.

Étude de cas : l'observation et la transition hélio-géocentrique

Choix d'un objectif épistémologique et d'un contexte d'enseignement

Les études sur les représentations des élèves de la/des science(s) montrent qu'elles sont souvent incohérentes et éloignées d'une vision socio-constructiviste des sciences. Comme le note Deng et ses collaborateurs, ces représentations « naïves » s'éloignent d'une vision « informée » où « la connaissance est construite de façon active par un individu pensant seul ou au travers d'échanges. Elle n'est pas reçue ou transmise passivement de l'environnement […]. Elle ne vise pas la découverte d'une réalité objective et certaine (ou vraie) existant indépendamment du monde éprouvé par l'individu et social » (Deng *et al.*, 2011 : 964 ; notre traduction)[7].

Ce résumé proposé par Feng Deng et ses collaborateurs rejoint les constats faits par d'autres chercheurs à propos des modèles et de la modélisation (Treagust Chittleborough & Mamiala, 2002 ; Cheng & Lin, 2015). Dans l'activité de modélisation, la dimension théorique est sous-estimée en

---

6 Cela ne signifie pas qu'un travail sur document original est nécessairement banni. Si l'objectif épistémologique poursuivi le nécessite, des écrits originaux peuvent être retenus et, si nécessaire, accompagnés d'un lexique.

7 *« knowledge is actively constructed within a thinking person individually or through social exchanges. It is not passively received or transmitted from the environment […]. Knowing is not targeted toward the discovery of an objective and certain reality (or truth) that may exist independently from the individual's experiential or social world ».*

faveur de la dimension empirique. La démarche inductive est privilégiée (on part de l'observation, des mesures et on généralise). Un modèle décrit la réalité telle qu'elle est (la vérité est celle de la correspondance modèle-réalité et non celle intersubjective au sein d'une communauté). Cela résonne avec les recherches sur la *NoS* (Lederman, 2007) qui montrent que la dimension « sociale » de l'activité scientifique (la dimension collective et argumentative de la preuve) est sous-estimée et que la dimension « humaine » est peu perçue/réduite (l'observation est « neutre », alors qu'elle est chargée de théorie et repose sur des présupposés et des valeurs).

Étant donné qu'une représentation de l'observation comme fondatrice des savoirs scientifiques, « neutre » et indépendante de tout cadre théorique et métaphysique, apparaît comme une difficulté majeure pour l'acquisition d'une vision socioconstructiviste de la/des science(s), le choix a été fait de travailler cet obstacle en proposant une situation d'enseignement à caractère historique. Parmi les différents thèmes au programme de l'enseignement de physique-chimie en lycée[8], celui intitulé « Temps, mouvement et évolution » de la classe de terminale S a retenu l'attention, et plus précisément le contenu désigné par « Révolution de la Terre autour du Soleil ». Le préambule du cycle terminal (première et terminale S) recommandait en effet « l'approche historique comme démarche didactique destinée à mettre la science en contexte et en culture ». De plus, dans la partie portant sur le système solaire, il était noté que : « La plus grande révolution dans l'histoire de la pensée, l'hypothèse copernicienne, n'a pas été avancée pour des raisons liées aux observations du temps, qui trouvaient une explication apparemment plus naturelle dans la cosmogonie aristotélicienne. » Par ailleurs, le programme laissait la possibilité d'introduire des activités documentaires, en mettant l'accent sur la modélisation : « Les supports d'informations proposés aux élèves seront multiples et diversifiés. […] L'exploitation sera conduite en passant par l'étape d'identification des grandeurs physiques ou chimiques pertinentes et par celle de modélisation. »

---

[8] BOEN n° 8 du 13 octobre 2011, Enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie de la série scientifique, classe terminale.

Questions de recherche

La recherche doctorale s'est alors orientée, entre autres[9], vers l'exploration des représentations des élèves sur l'inscription humaine et sociale des savoirs dans le cas particulier de l'observation d'une part, et vers l'examen de la possibilité de les faire évoluer grâce à l'introduction de l'histoire de la transition géo-héliocentrique d'autre part. Parmi les différentes questions explorées dans la recherche, nous retenons celles présentées ci-dessous afin de montrer comment les outils d'analyse présentés plus haut ont guidé l'élaboration de la séquence d'enseignement et l'analyse de son impact sur les élèves.

1. Pour les élèves, quelle est la place de l'observation dans la pratique scientifique, plus précisément l'observation doit-elle être première ou non, est-elle orientée ou non par un cadre conceptuel ?
2. Pour les élèves, un savoir scientifique résultant de l'observation reste-t-il ou non chargé de théorie ? Décrit-il ou non une réalité indépendante de l'observateur ?
3. Quelles dimensions de la *NoS* sont évoquées par les élèves ? Quelle place accordent-ils aux dimensions associées à l'Homme, la communauté scientifique et la société ?
4. Quelle est l'évolution des représentations des élèves en termes de positionnement d'une part, de dimensions évoquées et de leur richesse d'autre part ?

Méthodologie

Dans la lignée des propositions précédentes, une séquence de type investigation documentaire a été élaborée pour la classe de terminale S. Une étude

[9] La problématique générale portait sur les rapports sciences-croyances. Celle-ci était double : différenciation des registres scientifiques et religieux *via* la distinction entre croyances religieuses et présupposés métaphysiques scientifiques d'une part, croyances au sein des sciences *via* l'inscription socio-culturelle et humaine de l'observation et *via* les scientifiques ayant des croyances, pour certaines religieuses, d'autre part.

historique et épistémologique des modèles d'univers a conduit à la rédaction de sept textes sur la transition géo-héliocentrique pour les élèves, mettant en valeur l'interpénétration des différents éléments qui façonnent les sciences. Chacun des sept textes contextualise la contribution d'un scientifique, aussi bien sur le plan sociétal qu'individuel : certains des présupposés et valeurs qui ont orienté son travail sont mentionnés, certains renvoyant au contexte culturel de l'époque et à la religion. L'annexe 1 met en perspective un des textes, celui sur Nicolas Copernic, avec la grille multidimensionnelle de la *NoS* et le schéma de la modélisation fondée sur des présupposés proposé par Maurines (2010). Les six autres textes ont été consacrés à Aristote, Claude Ptolémée, Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galilée, Isaac Newton.

La séquence d'enseignement innovante consiste en une séance en demi-groupe de deux heures, suivie de deux séances en classe entière d'une heure. Le suivi de l'expérimentation repose sur trois questionnaires. Le tableau 3 présente la structure de la séquence et les outils élaborés pour le recueil de données. La séquence a été expérimentée dans le cadre contraint d'une classe de terminale S auprès de 30 élèves en mai 2015 par l'enseignant qui réalisait la thèse[10]. Les outils proposés aux élèves pour extraire les informations des textes et préparer l'activité de synthèse sont présentés en annexe 2. Au nombre de deux, ils portent sur un scientifique et se présentent sous la forme d'un tableau à renseigner et d'un diagramme à compléter. En cohérence avec les objectifs visés et les textes élaborés, ce diagramme, inspiré du schéma de la modélisation proposé par Maurines (2010), évoque l'existence non seulement du registre scientifique théorique, mais aussi du registre métaphysique qui sous-tend la pratique du scientifique. Un registre religieux est également mentionné afin d'inscrire la science dans un contexte culturel et considérer le scientifique comme une personne pouvant avoir des croyances métaphysiques religieuses[11]. L'annexe 3 présente le document de synthèse distribué par l'enseignant en fin de séance.

---

[10] Cette séquence a été testée au préalable deux fois, en 2013 et 2014, ce qui a permis d'améliorer les textes, les questionnaires, le dispositif lui-même (pour les améliorations, voir : Journaux, 2018).

[11] En cohérence avec la problématique générale sur les rapports sciences-croyances/religions.

Séance 1 en travaux pratiques (TP) (2 h) – 2 groupes de 15 élèves		**Suivi recherche**
Appropriation du problème	Présentation + situation d'accroche	**Questionnaire Q1** (N=30)
	Réponse individuelle par écrit	
Résolution du problème	Répartition des textes (scientifique/personne) entre les groupes Lecture et extraction des informations à l'aide du tableau (personne)	**Tableaux** (2 groupes N=7) *Le scientifique* *et la position défendue* *Les nouveaux éléments apportés ;* *Les arguments invoqués ;* *Position par rapport à la religion*
	Organisation des informations contenues dans le tableau *(phénomènes, modèles et arguments)* Construction d'un schéma de synthèse partielle (personne)	**Carnet de bord** *(justification des choix et difficultés rencontrées)* **Diagrammes intermédiaires** (2 groupes N=7)
Séance 2 en cours 1 h – 30 élèves		
	Analyse et comparaison des diagrammes partiels (personne)	**Questionnaire Q2** (N=30)
Institutionnalisation	**Diagramme de synthèse** (institution/science) + discussion sur l'idée de science	
Séance 3 en cours 1 h – 30 élèves		
Enrichissement/ Évaluation	Texte « De Neptune à Vulcain »	**Questionnaire Q3** (N=30)

Tableau 3 – Organisation de la séquence expérimentée et du suivi recherche

Source : D'après Journaux, 2018 : 161.

Les questionnaires passés au début de la séquence (Q1) et immédiatement après (Q2) comportent chacun six questions ouvertes ou fermées avec demande de justification. Q1 proposait des questions générales inspirées pour partie de la littérature sur la *NoS* et Q2 des questions contextualisées à la transition géo-héliocentrique. En suivant Allchin (2011), le questionnaire Q3 passé quinze jours après vise à estimer la capacité des élèves à réinvestir ce qu'ils ont appris au cours de la séquence innovante dans un autre contexte historico-scientifique. Il se présente sous la forme d'un texte portant sur la découverte de Neptune et la (non-)découverte de Vulcain, accompagné de quatre questions ouvertes.

Les réponses fournies par les élèves à chaque questionnaire ont été analysées question par question et les résultats de certaines questions d'un même questionnaire ont été croisés afin de lever, si possible, certaines ambiguïtés ou repérer l'existence éventuelle de profils d'élèves. Deux types d'analyse ont été réalisés. D'une part, les réponses ont été catégorisées par un processus itératif couplant analyse *a priori* et *a posteriori*, et certains types de réponses ont été rapprochés de positionnements épistémologiques allant de positionnements naïfs à informés. D'autre part, la grille de la *NoS* a été mobilisée pour repérer les dimensions des pratiques évoquées dans une réponse et ce, indépendamment du nombre de fois où une dimension est évoquée par l'élève. Un exemple de codage de réponses obtenues est présenté dans le tableau 4. La recherche de la stabilité intersubjective du codage sur l'ensemble du corpus reste à finaliser.

Réponses d'élèves	Dimensions de la NoS								
	Vis	Obj	Res	Pro	Ela	Att	Com	Soc	Tps
De leur point de vue, un phénomène peut avoir plusieurs causes.	x	x							
L'observation est la base de l'explication mais l'observation peut être fausse, il ne faut donc pas se fier seulement à l'observation	x				x	x			

Tableau 4 – Exemple de codage de réponses d'élèves

Source : D'après Journaux & Maurines, 2020 : 702.

Pour estimer l'impact de la séquence sur un point épistémologique particulier, les résultats obtenus à des questions portant sur ce point ont été comparés, questions formulées de manière générale avant enseignement et contextualisées après (voir par exemple les questions associées aux figures 5 et 6). Cette comparaison a été faite aussi bien pour les résultats en termes de positionnement que ceux en termes de dimensions.

L'impact de la séquence sur la richesse des représentations de la *NoS* de la part d'un élève et de la classe a été estimé à l'aide de deux critères : le nombre de dimensions évoquées à un questionnaire d'une part, la

répartition de ces dimensions d'autre part. Compte tenu des objectifs poursuivis dans la séquence, il était notamment attendu après enseignement un nombre de dimensions évoquées plus élevé qu'au début de la séquence et une présence plus importante des dimensions témoignant de l'inscription humaine et socio-culturelle des savoirs : visées (au travers de la sous-dimension « Présupposés et valeurs »), attitudes/qualités (des acteurs), société (contexte culturel et religieux).

Résultats

Nous présentons les résultats obtenus sur la place et le rôle de l'observation dans l'élaboration des savoirs scientifiques, puis nous montrons comment l'analyse en termes de dimensions de la *NoS* permet d'apporter des éléments de réponse sur l'inscription humaine et sociale de ces savoirs. Les histogrammes présentés ci-après donnent la répartition des unités d'analyse (ua) repérées dans les réponses fournies par l'ensemble des élèves à une question (voir Figures 2 à 5) ou à l'ensemble des six questions des questionnaires Q1 ou Q2 (voir Figure 6). La figure 7 donne la répartition obtenue pour deux élèves pour lesquels le même nombre d'ua a été repéré au questionnaire Q1, la figure 8 la différence entre les nombres d'ua repérés avant et après enseignement pour chaque élève de la classe.

La place et le rôle de l'observation

Avant enseignement, la majorité des élèves (77 %, N=30) répond qu'un bon physicien est quelqu'un qui observe d'abord. Seuls 17 % des élèves répondent par la négative. Si les premiers justifient leur réponse en mettant en avant une démarche inductive : « C'est suite à ses observations qu'il propose des explications », les seconds ancrent l'observation dans une réflexion théorique : « Le physicien doit d'abord réfléchir à ce qu'il veut prouver, puis établir un protocole et enfin observer. »

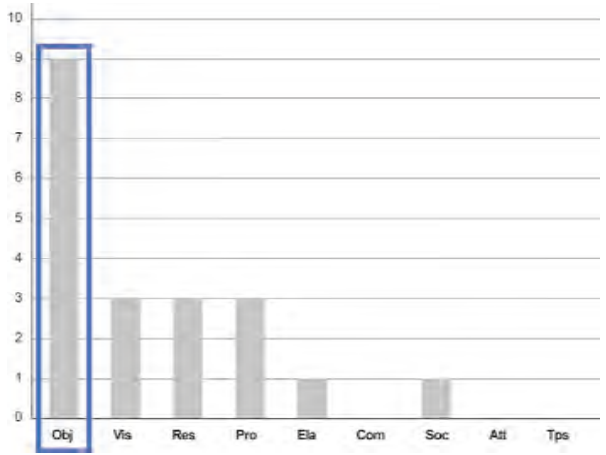
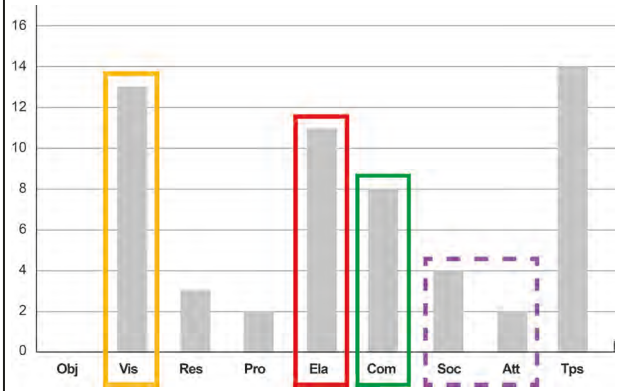
Juste après enseignement, 83 % des élèves répondent que la séquence les a conduits à reconsidérer la place de l'observation : « C'est une idée reçue que de croire que l'élaboration du savoir scientifique se base sur l'observation […]. » Quinze jours après enseignement, une majorité d'élèves (73 %) considèrent que Urbain Le Verrier a contribué à la découverte de

Neptune (seul pour 53 % ou avec Johann Gottfried Galle pour 20 %), prenant ainsi en compte la dimension théorique. Seuls 17 % des élèves donnent priorité à l'observation par Galle.

L'inscription humaine et culturelle de l'observation et des savoirs

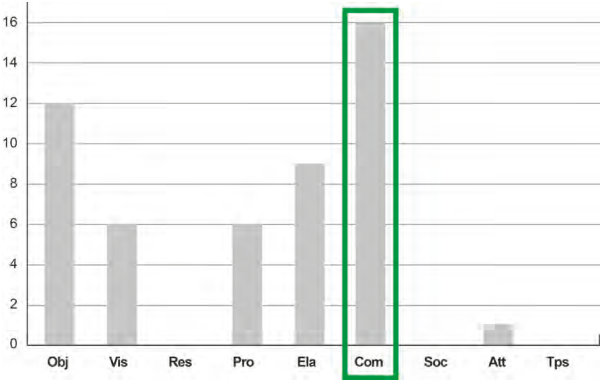
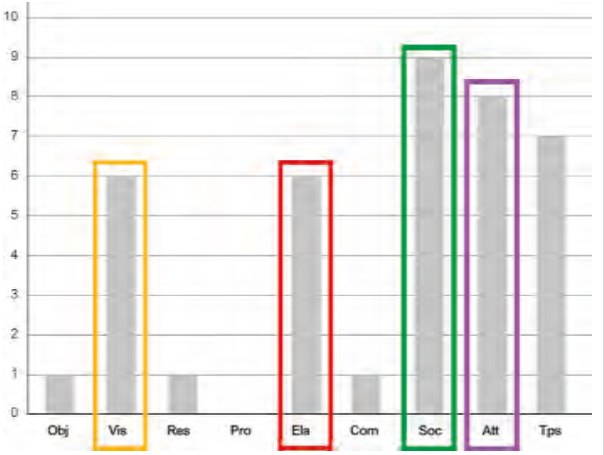
Avant enseignement, les élèves ont des difficultés à répondre à la question leur demandant quels sont les arguments avancés par les scientifiques en faveur de l'héliocentrisme aux XVI^e^-XVII^e^ siècles. Environ les deux tiers d'entre eux répondent qu'ils ne savent pas (63 %, N=30). Parmi ceux qui répondent, la majorité n'évoque qu'un seul registre du schéma de la modélisation, en mettant l'accent soit sur les observations (« En regardant le mouvement des autres planètes »), soit sur des éléments théoriques (« Loi de Kepler [ellipse]. La Terre tourne autour du Soleil en formant une ellipse »). Seuls deux élèves articulent les registres empirique et théorique. L'analyse en termes de dimensions de la *NoS* des réponses fournies à cette question (voir Figure 2) révèle un accent mis sur la dimension « Objet ».

Après enseignement, l'analyse fondée sur l'approche anthropologique des pratiques montre une présence relative plus importante des dimensions de la *NoS* en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis dans la séquence (voir Figure 3). En plus de la dimension historique dont l'augmentation est liée à la nature même de la séquence, les élèves évoquent des éléments relevant principalement des visées et caractéristiques générales des sciences, de l'élaboration et des démarches, de la communauté. Apparaissent également dans une moindre mesure les dimensions liées aux qualités des acteurs et à la société. Il est à noter que la mobilisation de ces dimensions et catégories ne suffit pas pour caractériser complètement la vision des sciences renvoyée par une réponse. Ainsi, la réponse suivante renvoie à une vision informée des sciences dans laquelle l'observation a un ancrage théorique : « Contrairement à ce qu'on pouvait croire, une observation neutre n'existe pas, elle est guidée par des théories déjà supposées ou envisagées. » En revanche, cette autre réponse se rapproche d'une vision naïve de type réaliste pour laquelle il n'y a pas de croyances dans les sciences : « Il faut faire abstraction de tous nos préjugés, de toutes nos croyances pour arriver à interpréter des phénomènes sans influence. »

Avant enseignement	Après enseignement
Selon vous, quels arguments ont été avancés par les scientifiques au XVI^e^-XVII^e^ s. en faveur de l'héliocentrisme ?	*Qu'est-ce que cette séance vous a appris d'important sur l'élaboration des savoirs scientifique ?*
	

Figures 2 et 3 – Distribution des dimensions repérées sur les réponses fournies à une question des questionnaires Q1 et Q2

Source : Journaux, 2018 : 184 et 236.

Avant enseignement	Après enseignement
Deux physiciens qui observent le même phénomène peuvent-ils proposer une explication différente ?	*Comment expliquez-vous que Ptolémée et Copernic défendent des positions différentes ?*
	

Figures 4 et 5 – Distribution des dimensions repérées sur les réponses fournies à une question des questionnaires Q1 et Q2

Source : Journaux, 2018 : 196 et 246.

La comparaison des dimensions évoquées en réponse à des questions posées avant et après enseignement portant toutes les deux sur l'observation révèle des modifications similaires du profil de la classe (voir Figures 4 et 5) et significatives ($p<2{,}3\ 10^{-5}$). Si avant enseignement, les justifications relèvent en premier lieu de la dimension « Communauté » (au travers de la diversité des acteurs et de leur façon de penser), après enseignement elles correspondent aux dimensions visées (présupposés, observation inscrite), élaboration (diversité des démarches), société (contexte culturel) et attitudes/qualités (scientifiques croyants/religion).

Richesse des représentations de la NoS

Sur les réponses fournies par la classe au questionnaire Q1, 242 évocations des neuf dimensions ont été dénombrées. La dimension « Élaboration » est plus évoquée que les dimensions associées à l'inscription humaine et sociale des savoirs (voir Figure 6, séance 1). Les réponses des élèves au questionnaire Q2 sont plus fournies (282 évocations). La répartition des dimensions évoquées indique une inscription humaine et sociale plus grande qu'avant enseignement (voir Figure 6, séance 2) : les dimensions « Objets » et « Élaboration » sont moins présentes contrairement aux dimensions « Visées », « Société » et « Attitude ». La différence de répartition des dimensions évoquées sur l'ensemble des questionnaires Q1 et Q2 est significative ($p=3,\ 8\ 10^{-3}$).

Le nombre moyen d'évocation des neuf dimensions par élève avant enseignement pour le questionnaire Q1 est de 8,1, l'écart type étant de 2,1 et les valeurs minimale et maximale de 3 et 14, soit 1,35 dimension évoquée par élève et question. Deux élèves pour lesquels le même nombre moyen d'évocations à un questionnaire est repéré peuvent évoquer des dimensions différentes de la *NoS*, renvoyant ainsi des représentations différentes (voir l'exemple donné à la figure 7 dans le cas du questionnaire Q1).

Le nombre moyen d'évocations des neuf dimensions par élève après enseignement est plus élevé. Il est de 9,4 pour le questionnaire Q2, soit 1,57 par élève et question. On note une hétérogénéité plus grande de la classe (ce qu'indique également la figure 8) : l'écart-type du nombre moyen d'évocation des dimensions par élève est de 3,1, les valeurs minimale et maximale étant de 1 et 17. L'évolution avant et après enseignement est significative ($p=1{,}2\ 10^{-2}$).

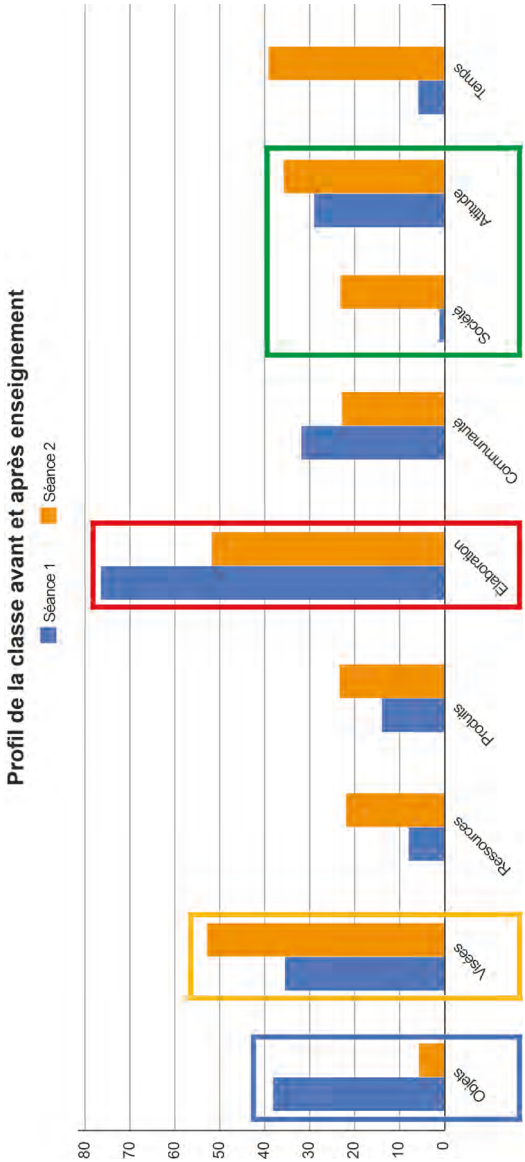


Figure 6 – Distributions des dimensions repérées sur les réponses fournies par la classe à l'ensemble des questions d'un questionnaire passé avant ou après enseignement

Source : D'après Journaux, 2018, 222 et 272.

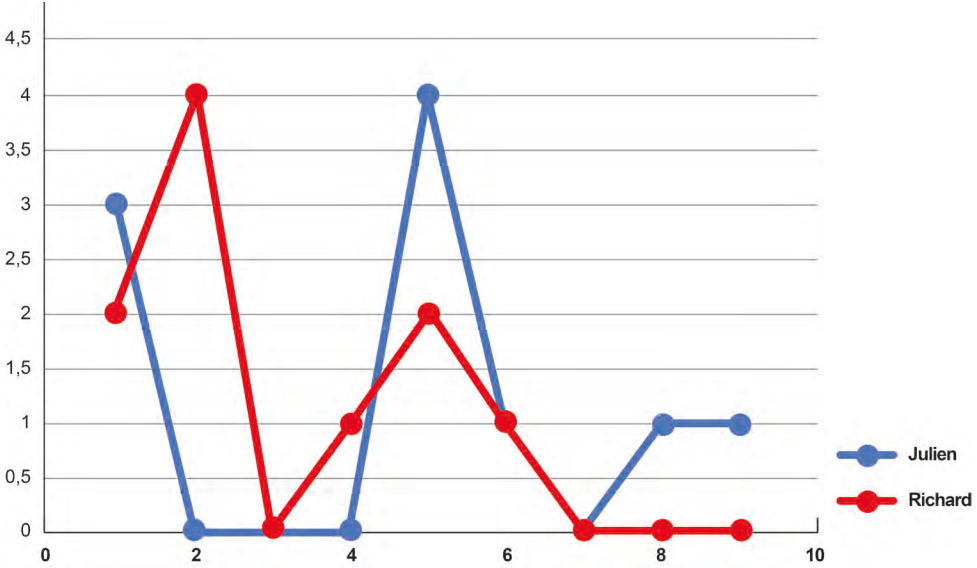


Figure 7 – Profils de deux élèves avant enseignement pour lesquels le nombre d'unités analysées en termes de dimensions est identique (=10)

Source : Journaux, 2018 : 221.

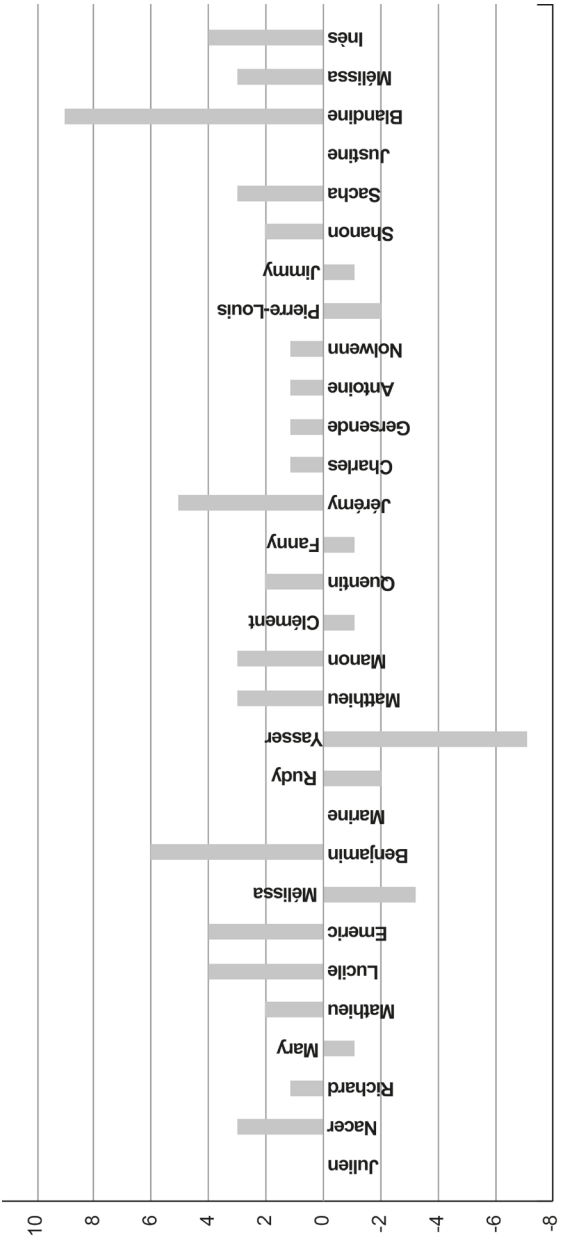


Figure 8 – Différences entre les nombres de dimensions repérées pour chaque élève avant et après la séquence

Source : Journaux, 2018 : 271.

Réception de la séquence par les élèves

La dernière question du questionnaire Q2 comportait deux parties, la première porte sur la place de la réflexion sur les sciences dans la formation d'une personne, et en particulier d'un scientifique (*est-ce qu'il vous semble important de réfléchir sur ce qu'est l'activité scientifique ?),* la seconde appelle les élèves à la réflexivité (*ne peut-on considérer que vous aviez vous-même une forme de présupposé vis-à-vis de l'activité scientifique elle-même ?).*

La majorité des élèves (83 %) soutiennent qu'il est important de réfléchir sur ce qu'est l'activité scientifique. Parmi les élèves qui affirment le contraire, certains précisent que cette activité est difficile et d'autres qu'elle est en dehors du contrat didactique : *« Non, car il y a des théories plus importantes sur lesquelles il faut réfléchir. »* Ce résultat rejoint celui obtenu par Mohamed Slaïmia (2014 ; Slaïma & Maurines, 2017) qui constate que certains élèves de la classe de niveau plus faible affirment que d'autres choses plus importantes sont à faire. Parmi les élèves qui trouvent un intérêt à l'introduction de l'HS dans les cours de sciences, certains se projettent en tant que futurs scientifiques : *« Cela nous concerne. Si nous sommes en S, nous serons impliqués plus tard dans l'activité scientifique »*, *« Il est important pour nous qui travaillons les sciences d'en savoir [sur] son essence et du comment travailler en science. Il faut savoir être ouvert et non dogmatique en science pour aller plus loin. »* D'autres ne se positionnent pas en tant que scientifique : *« La science permet de mieux comprendre le monde qui nous entoure »*, *« Cela est important, car cela nous concerne tous. »* D'autres enfin développent l'argument de l'apprentissage des savoirs scientifiques : *« C'est important, car on ne sait pas d'où viennent ces calculs. »*

Une majorité d'élèves fait preuve de réflexivité : 73 % d'entre eux reconnaissent qu'ils avaient une forme de présupposé sur la *NoS* avant de débuter la séquence, 20 % affirmant le contraire. Les justifications fournies mettent en lumière la dimension théorique, les présupposés, la dimension sociale (argumentation, controverses) : *« On considère que la science serait capable de tout expliquer ; c'est peut-être faux »*, *« Avant je supposais que tout ce que la science disait était vrai. »*

Discussion et conclusion

Revenons sur les résultats que nous venons de présenter avant de développer quelques-unes des questions qui méritent d'être explorées en lien avec le cadre théorique.

Les résultats obtenus avant enseignement renvoient une vision des sciences que l'on peut qualifier d'empirico-inductive et rejoignent ceux de la littérature, ce qui confirme l'hypothèse/présupposé de recherche sur les représentations des élèves et conforte le choix de l'objectif travaillé en classe. Ceux obtenus après enseignement montrent une inscription humaine et socio-culturelle davantage présente. Les contraintes de l'expérimentation ont conduit le doctorant à explorer les représentations des élèves avec des questions abordant le même point épistémologique, mais formulées différemment. Si l'on ne peut exclure l'éventualité d'un lien avec les différences observées, l'hypothèse est faite que c'est la séquence elle-même qui a permis l'évolution des représentations, hypothèse qui semble renforcée par les résultats obtenus quinze jours plus tard et qui confirme l'hypothèse/présupposé de recherche sur la possibilité de faire évoluer les représentations des élèves grâce à l'HS.

Si l'impact de la séquence semble positif, voire très positif pour la plupart des élèves, il doit être nuancé. En effet, les résultats montrent une hétérogénéité plus grande de la classe après enseignement qu'avant et un retrait de quelques élèves des activités proposées. Cela interroge sur la possibilité et la façon d'engager l'ensemble d'une classe dans une réflexion épistémologique et des activités documentaires. Se pose également la question de la généralisation de ces résultats. Un autre objectif épistémologique, une autre séquence rencontreraient-ils le même accueil ? Seraient-ils les mêmes avec un autre enseignant non engagé dans une recherche doctorale ?

Si les résultats obtenus après enseignement semblent indiquer une évolution des représentations des élèves relative aux objectifs explicitement travaillés et institutionnalisés (rapport théorie-observation et l'inscription humaine et sociale des pratiques), ils ne permettent pas d'affirmer que les représentations des élèves correspondent à une vision socio-constructiviste des sciences. La question du rapport des savoirs à

la réalité a en effet été plus délicate à évaluer au travers des questions posées. Les justifications fournies suggèrent une vision réaliste « naïve », de « vérités » et d'erreurs à éviter pour l'atteindre, et résonnent ainsi avec des constats observés dans les années 1990, par exemple par Larochelle et Désautels (1992). Cela conduit à interroger non seulement les questions posées aux élèves, mais aussi la séquence elle-même. Au cours de cette séquence, originale à maints égards, il s'est agi en effet non seulement d'élaborer des documents et un dispositif répondant à un objectif épistémologique peu, voire pas travaillé dans la littérature, mais aussi de mobiliser des outils d'analyse nouveaux. Arrivés au terme de la recherche, se pose la question de la progressivité des objectifs qui permettrait d'explorer *in fine* le rapport du modèle à la réalité, et celle connexe de la progressivité de la *NoS*, autrement dit de la focale à retenir pour chaque objectif poursuivi.

Au travers de cet exemple, nous avons souhaité mettre en lumière comment le cadre théorique d'orientation didactique a soutenu l'élaboration de la séquence, son expérimentation et l'analyse des résultats obtenus. Parmi les questions dont l'exploration mérite d'être poursuivies, certaines portent sur la mobilisation des deux cadres d'analyse de la *NoS* en tant qu'outils. La grille multidimensionnelle de la *NoS* a permis de caractériser les éléments historiques introduits dans les textes et de repérer l'inscription humaine et sociale des sciences, de caractériser les profils et degré d'homogénéité d'une classe, de comparer les profils des élèves. La réflexion sur la façon de mobiliser cette grille pour étudier les représentations, notamment sur la façon de l'articuler avec une étude des positionnements, demande à être prolongée. Une analyse à un grain plus fin des dimensions et un examen des liens établis entre dimensions et sous-dimensions semblent nécessaires. De plus, une question demeure, celle sur la façon de mobiliser la grille afin d'apprécier la complexité des représentations. Si le schéma de la modélisation fondée sur des présupposés a également permis de caractériser les éléments historiques introduits dans les textes et a inspiré le schéma fourni aux élèves, ainsi que celui de la synthèse des informations et institutionnalisation, il a été peu mobilisé en tant que tel dans l'analyse des réponses, même s'il l'a soutenue. Le travail esquissé sur les réponses à la question portant sur les

arguments en faveur de l'héliocentrisme demande à être poursuivi, ce qui suppose d'inscrire/articuler le cadre de la modélisation dans le cadre des pratiques.

Pour terminer, notons que l'élaboration et l'expérimentation d'une séquence innovante par un chercheur conduisent à s'interroger sur les modalités de sa diffusion auprès des enseignants. Il s'agit alors d'examiner, entre autres, la réception du dispositif par ces derniers, leur appropriation et leur mise en œuvre des ressources fournies. Des études montrent que poursuivre un objectif épistémologique en classe de science suscite parfois des réticences fortes chez les enseignants (Slaïmia, 2014) et soulève des difficultés significatives (Höttecke, Henke & Riess, 2012). Les premières sont en lien avec les représentations de l'enseignement des sciences (les visées et les contenus de formation) et les secondes avec leur formation. La place désormais accordée à la dimension épistémologique par les programmes d'enseignement de sciences et de formation d'enseignants (si elle n'est pas encore opérationnalisée, elle est tout au moins davantage présente et explicitée) laisse espérer une évolution favorable de l'introduction de l'HS à des fins épistémologiques et invite à l'exploration d'éventuelles évolutions.

Références bibliographiques

Abd-El-Khalick Fouad, 2013. « Teaching *With* and *About* Nature of Science, and Science Teacher Knowledge Domains », *Science & Education*, 22 (9), p. 2087-2107, https://doi.org/10.1007/s11191-012-9520-2.

Adúriz-Bravo Agustín, 2010. « Use of the History of Science in the Design of Research-Informed NOS Materials for Teacher Education », in P. V. Kokkotas, K. S. Malamitsa, & A. A. Rizaki (eds), *Adapting Historical Knowledge Production to the Classroom*, Rotterdam, SensePublishers, p. 195-204, https://doi.org/10.1007/978-94-6091-349-5_14.

Allchin Douglas, 2004. « Pseudohistory and Pseudoscience », *Science & Education*, 13, p. 179-195, https://doi.org/10.1023/B:SCED.0000025563.35883.e9.

Allchin Douglas, 2011. « Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science », *Science Education*, 95 (3), p. 518-542, https://doi.org/10.1002/sce.20432.

Beaufils Daniel & Maurines Laurence, 2013. « L'image de la physique au travers de l'enseignement de la spectroscopie : propositions didactiques », *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 107 (956), p. 657-679.

Beaufils Daniel, Maurines Laurence & Chapuis Claude, 2010. « Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique et chimie », *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 104 (924), p. 581-598.

Chareix Fabien, 2011. *La révolution galiléenne. Cosmos et univers*, Paris, Ellipses.

Cheng Meng-Fei & Lin Jang-Long, 2015. « Investigating the Relationship between Students' Views of Scientific Models and Their Development of Models », *International Journal of Science Education*, 37 (15), p. 2453-2475, https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1082671.

Chevallard Yves, 1985. *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble, Éditions La pensée sauvage.

Cobern William W. & Aikenhead Glen S., 1998. « Cultural Aspects of Learning Science », *in* B. J. Fraser & K. G. Tobin (eds), *International Handbook of Science Education*, Dordrecht, Kluwer Academic, p. 39-52.

Décamp Nicolas & Hosson Cécile de, 2012. « Implementing Eratosthenes' Discovery in the Classroom: Educational Difficulties Needing Attention », *Science & Education*, 21 (6), p. 911-920, https://doi.org/10.1007/s11191-010-9286-3.

Deng Feng, Chen Der-Thanq, Tsai Chin-Chung & Chai Ching Sing, 2011. « Students' Views of the Nature of Science: A Critical Review of Research », *Science Education*, 95 (6), p. 961-999, https://doi.org/10.1002/sce.20460.

Duschl Richard A., & Grandy Richard, 2013. « Two Views About Explicitly Teaching Nature of Science », *Science & Education*, 22 (9), p. 2109-2139, https://doi.org/10.1007/s11191-012-9539-4.

Erduran Sibel & Dagher Zoubeida R, 2014. *Reconceptualizing the Nature of Science for Science Education: Scientific Knowledge, Practices and Other Family Categories*, Dordrecht, Springer.

Fauque Danielle, 2006. « La "longue marche" d'un enseignement de l'histoire des sciences et des techniques », *Tréma*, 26, p. 34-47, https://doi.org/10.4000/trema.83.

Gingras Yves, 2016. *L'impossible dialogue. Sciences et religions*, Paris, Presses universitaires de France.

Henke Andreas & Höttecke Dietmar, 2015. « Physics Teachers' Challenges in Using History and Philosophy of Science in Teaching », *Science & Education*, 24 (4), p. 349-385, https://doi.org/10.1007/s11191-014-9737-3.

Hodson Derek, 2009. *Teaching and Learning about Science: Language, Theories, Methods, History, Traditions and Values*, Rotterdam/Boston, Sense publishers.

Hosson Cécile de & Kaminski Wanda, 2007. « Historical Controversy as an Educational Tool: Evaluating Elements of a Teaching-Learning Sequence Conducted with the Text "Dialogue on the Ways that Vision Operates"», *International Journal of Science Education*, 29 (5), p. 617-642, https://doi.org/10.1080/09500690600802213.

Höttecke Dietmar, Henke Andreas & Riess Falk, 2012. « Implementing History and Philosophy in Science Teaching: Strategies, Methods, Results and Experiences from the European HIPST Project », *Science & Education*, 21 (9), p. 1233-1261, https://doi.org/10.1007/s11191-010-9330-3.

Hulin Nicole, 1996. « Histoire des sciences et enseignement scientifique. Quels rapports ? Un bilan XIX^e^-XX^e^ siècles », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 90 (786), p. 1201-1243.

Journaux Nicolas, 2018. *Le physicien, l'observation et ses présupposés, au travers de l'histoire des modèles d'univers : représentations d'élèves de terminale S.*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines, Orsay, Université Paris-Saclay.

journaux Nicolas & maurines Laurence, 2020. « Représentations d'élèves sur le physicien et l'observation. la transition géo-héliocentrique en classe de terminale scientifique », in M.-N. Hindryckx & C. Poffé (dir.), *Actes des onzièmes rencontres scientifiques de l'Association pour la recherche en didactique des sciences et technologies (ARDiST)*, Bruxelles, ARDiST, p. 693-703, https://ardist2020.sciencesconf.org/data/pages/ACTES_LAST.pdf (consulté le 27/03/2024).

Kuhn Thomas S., 1983. *La structure des révolutions scientifiques*. Paris, Flammarion.

Larochelle Marie & Désautels Jacques, 1992. *Autour de l'idée de science. Itinéraires cognitifs d'étudiants*, Bruxelles, De Boeck Université.

Lebeaume Joël, 1999. *L'éducation technologique. Histoires et méthodes*, Paris, ESF éditions.

Lederman Norman G., 2007. « Nature of Science: Past, Present and Future », *in* S. K. Abell & N. G Lederman (eds), *Handbook of Research on Science Education*, Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates, p. 831-879.

Martinand Jean-Louis, 1986. *Connaître et transformer la matière. Des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*, Berne, Peter Lang.

Maurines Laurence, 2010. « L'enseignement des sciences face au fait religieux. Au-delà des savoirs : l'idée de science », *in* L. Maurines (dir.), *Sciences et religions. Quelles vérités ? Quel dialogue ?*, Paris, Vuibert, p. 346-377.

Maurines Laurence & Beaufils Daniel, 2011. « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, p. 271-305, https://doi.org/10.4000/rdst.444.

Maurines Laurence, Gallezot Magali, Ramage Marie-Joëlle & Beaufils, Daniel, 2013. « La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la Terre », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 7, p. 19-52. https://doi.org/10.4000/rdst.674.

Morin Edgar, 2000. *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, Paris, Éditions du Seuil.

Monk Martin & Osborne Jonathan, 1997. « Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for the Development of Pedagogy », *Science Education*, 81 (4), p. 405-424, https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4%3C405::AID-SCE3%3E3.0.CO;2-G.

Osbeck Lisa M., Nersessian Nancy J., Malone Kareen R. & Newstetter Wendy C., 2013. *Science as Psychology: Sense-Making and Identity in Science Practice*, New York, Cambridge University Press.

Slaïmia Mohamed, 2014. *L'image de l'activité scientifique au travers de l'histoire de la dioptrique : élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement pour la classe de seconde ; rapport des enseignants tunisiens à l'enseignement des sciences et à l'innovation*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines & N. Ben Nessib, Université Paris-Sud/ISFEC-Tunis 1.

Slaïmia Mohamed & Maurines Laurence, 2017. « La diversité des pratiques scientifiques au travers de l'histoire de la dioptrique : expérimentation d'une innovation pédagogique en classe de seconde en Tunisie », *RDST. Revue en didactique des sciences et des technologies*, 15, p. 169-201, https://doi.org/10.4000/rdst.1507.

Toulmin Stephen, 1973. *L'explication scientifique*, Paris, Armand Colin.

Treagust David F., Chittelborough Gail & Mamiala Thapelo L., 2002. « Students' Understanding of the Role of Scientific Models in Learning Science », *International Journal of Science Education*, 24 (4), p. 357-368, https://doi.org/10.1080/09500690110066485.

Annexes

Annexe 1 : Un des textes du dossier dont quelques éléments sont rapprochés du cadre théorique sur la *NoS* et de la modélisation fondée sur des présupposés

a. Copernic (1473-1543)

Nicolas Copernic est un chanoine de la cathédrale de Frauenburg en Pologne. Il étudie le droit en Italie et s'intéresse particulièrement à l'astronomie.

Ses travaux sont publiés l'année de sa mort dans un livre intitulé *Des révolutions des orbes célestes*. Il y présente ses arguments en faveur de l'héliocentrisme, qui fait du **Soleil l'astre autour duquel tournent les planètes.**

Copernic a étudié **la théorie géocentrique** proposée par **Ptolémée** et acceptée depuis plus de **mille ans** par les astronomes. Mais Copernic n'adhère pas à la théorie géocentrique, qui fait de **la Terre le centre de l'Univers**. Il connaît la théorie héliocentrique d'un philosophe grec, **Aristarque de Samos** (v. 310-230 av. J.-C.), qui suggère que **le mouvement des astres** peut s'expliquer par un modèle dans lequel **le Soleil est au centre de l'Univers**. **Copernic**, **malgré ses croyances**, met en œuvre cette théorie pour interpréter le mouvement des planètes, en particulier celui de la Terre, car il est influencé par les écrits platoniciens qui insistent sur **la haute dignité du Soleil**, comme dans la célèbre allégorie de la caverne.

Bien que l'idée même d'une Terre en mouvement s'oppose à l'explication d'Aristote, Copernic admet encore le fait que les astres décrivent des cercles parfaits. Ainsi, selon lui, les planètes tournent autour du Soleil selon un mouvement circulaire uniforme.

Sa théorie est plus simple que celle de Ptolémée, parce qu'elle fait intervenir moins d'épicycles ; cependant, elle n'est pas plus **précise** que celle-ci. Mais, tout comme le système de **Tycho Brahe**, elle permet de **prédire l'existence** des phases de Vénus. La découverte de ce phénomène 50 ans après la mort de Copernic va attribuer à sa théorie un certain **pouvoir explicatif**. La théorie héliocentrique soulève cependant quelques objections : si la Terre se mouvait, l'on devrait ressentir son mouvement et les corps qui sont à sa surface devraient être jetés dans l'espace.

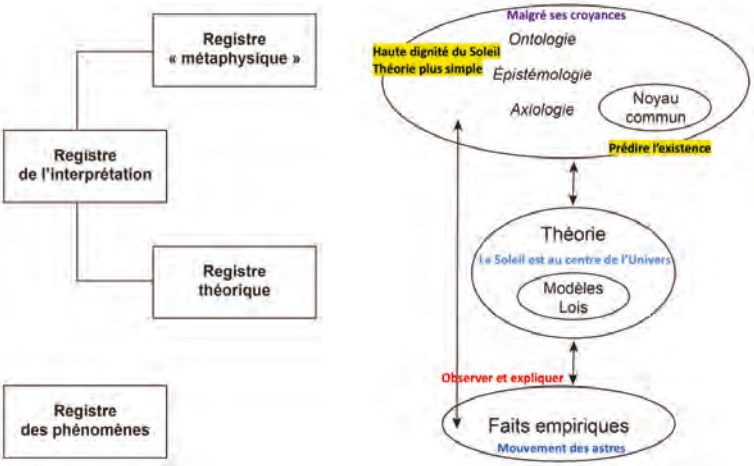
Malgré la prudence de la préface, écrite par l'éditeur Andreas Osiander qui précise que *« le système héliocentrique est un simple modèle mathématique permettant d'améliorer les calculs »*, l'ouvrage de Copernic connaîtra des difficultés avec les **autorités religieuses** lorsque **Galilée** en reprendra la thèse centrale au siècle suivant. En 1616, **l'Église** déclare la théorie héliocentrique incompatible avec les Saintes Écritures.

Le modèle héliocentrique du système solaire de Copernic (Chareix, 2001)

b. Grille de la *NoS*

9 dimensions (*a priori*)	
Visées et caractéristiques (présupposés et valeurs)	Attitudes
Objets d'étude	Communauté
Ressources	Société
Produits	Temps
Élaboration	

c. Modélisation fondée sur des présupposés



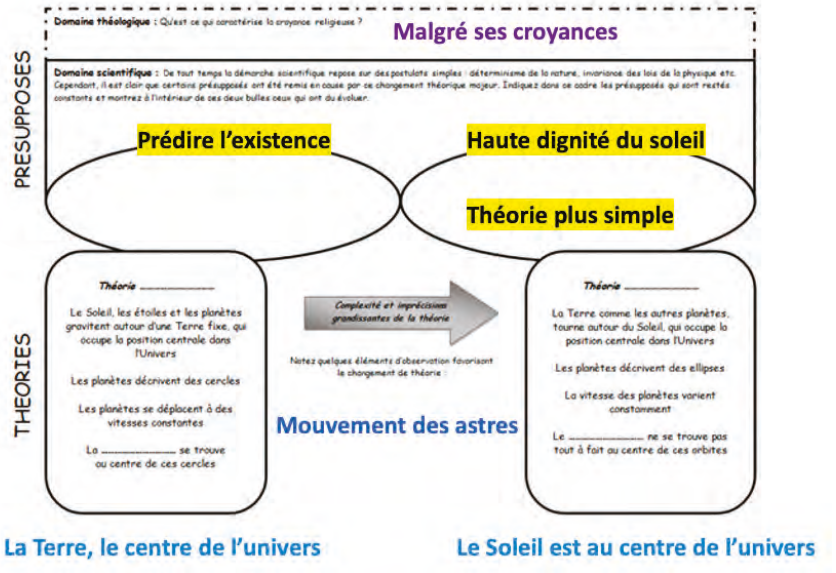
Source : D'après Journaux & Maurines, 2020 : 701.

Annexe 2 : Le tableau et les diagrammes proposés aux élèves au cours de la séquence

Scientifique ?	Position ?		Nouveaux éléments ?	Quels arguments ?	Position contradictoire avec vision cosmologique classique du christianisme ?		Opposition directe à la religion ?	
	Géo	Hélio			Oui	Non	Oui	Non
Copernic		x	*interprète mouvement planètes*	*théorie plus simple, pas plus précise*	x			x

a. Tableau pour extraire les informations d'un texte (exemple de Copernic)

Source : Journaux & Maurines, 2020 : 702.



b. Diagramme pour préparer la synthèse (exemple de Copernic)

Source : Journaux & Maurines, 2020 : 702.

Annexe 3 : Schéma de synthèse élaboré par l'enseignant/doctorant et distribué aux élèves

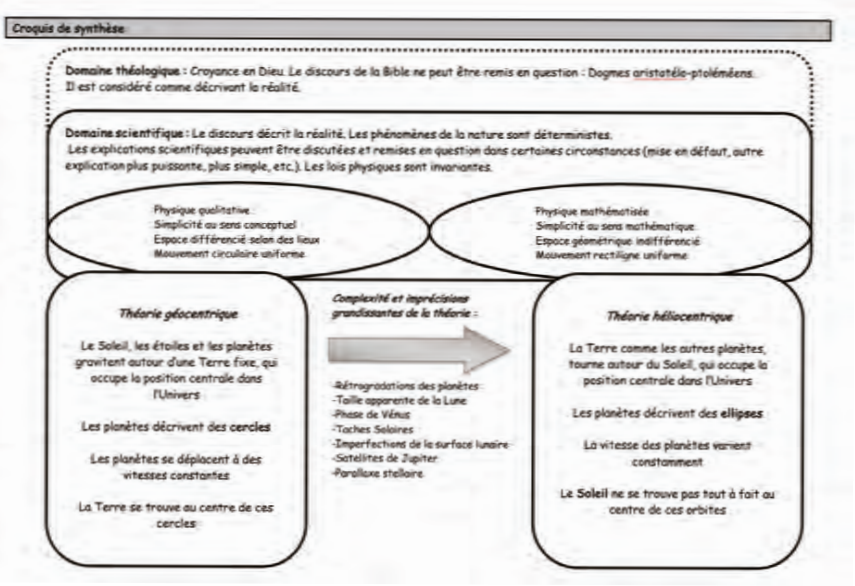


Diagramme de synthèse renseigné

Note : Il est à noter le décalage entre la conception socio-constructiviste de la science sur laquelle repose la séquence et l'emploi de l'expression « le discours décrit la réalité ».

Éloge d'une « physique de l'éphémère »

Introduction aux mouvements planétaires et à la relativité restreinte à partir d'une démarche historique mettant en valeur des phases de transitions dans l'élaboration des connaissances

Christian Bracco

Nous nous proposons d'éclairer des moments clés de l'histoire de la pensée scientifique, qui ne sont pas passés à la postérité car ils n'ont joué de rôle que sur une durée limitée, et de les utiliser à des fins d'enseignement. Cette approche, qui demande une connaissance historique détaillée, permet de reformuler les objectifs d'apprentissage en immergeant élèves et étudiants dans le processus scientifique créatif au cours duquel des hypothèses théoriques sont testées. D'un point de vue épistémologique, notre approche réintroduit une continuité dans l'histoire des idées scientifiques et permet d'établir un dialogue entre des connaissances autrement présentées de manière cloisonnée. Ainsi, pour un public connaissant les bases de la mécanique newtonienne, le renvoi à l'utilisation de l'« équant » dans un modèle héliocentrique par Johannes Kepler permet d'introduire, à partir de la trajectoire circulaire, l'idée de mouvements planétaires elliptiques ; celui à l'utilisation du « temps local » de Hendrik Antoon Lorentz de 1895 permet d'introduire le caractère non absolu du temps et de l'exploiter dans un cadre relativiste. Rétrospectivement, la physique mise en jeu, au regard de la théorie « exacte », constitue une approximation au premier ordre dans les variables physiques du problème (l'excentricité e dans le premier cas ; le rapport $V/c \sim 10^{-4}$ dans le second).

Mots-clés : équant, Kepler, temps local, Lorentz, Poincaré

Éléments de contexte

Le recours à l'histoire des sciences (en particulier l'histoire des idées scientifiques) est préconisé aujourd'hui dans les programmes d'enseignement

secondaire, notamment dans le programme commun d'enseignement scientifique en classes de première et terminale. Le réseau des instituts nationaux supérieurs du professorat et de l'éducation (Inspé), *via* son premier « Formathon » organisé en juin 2022 dans le cadre du « Printemps de la recherche en éducation », a lancé une réflexion sur la mobilisation de l'histoire des sciences dans différents contextes d'enseignement du secondaire, à laquelle ont participé des inspecteurs pédagogiques régionaux, des enseignants et des enseignants-chercheurs de diverses spécialités. Commençons par rappeler brièvement quelques enjeux autour de cette introduction.

Histoire des sciences et enseignement : enjeux et contextualisation

L'intérêt d'introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement a été l'objet de nombreux débats par le passé. Dès 1902, la réforme Georges Leygues de l'enseignement a insisté sur le rôle de l'histoire des sciences dans la transmission des savoirs, en particulier pour des publics non scientifiques. Nous renvoyons le lecteur au texte de Pierre Savaton, dans le présent volume, pour une mise en perspective de la place de l'histoire des sciences dans l'enseignement français. Outre-Atlantique, cette place a été discutée dès la seconde moitié du XX^e^ siècle sous l'impulsion de Gerald Holton (1952 ; 2003) et le lancement du *Harvard Physics Project* (Rutherford *et al.*, 1971-1972). Celui-ci prônait de manière ambitieuse une histoire des sciences « intégrée » à l'enseignement, à partir de laquelle l'enseignement disciplinaire devait se construire, et non une histoire des sciences « additionnelle » et minimaliste. Dans son article « Applied History of Science », John L. Heilbron a alors esquissé les contours d'une discipline recouvrant à la fois l'enseignement, les sciences de l'éducation et la politique scientifique (Heilbron, 1987). L'australien Michael R. Matthews (1994) est revenu quant à lui sur les différentes manières d'intégrer l'histoire des sciences à l'enseignement, à travers la revue *Science & Education* dont il est le fondateur et l'International History, Philosophy, and Science Teaching Group. Les questionnements soulevés par l'utilisation de l'histoire des sciences dans l'enseignement apparaissent également dans le contexte de la *NoS* (*Nature of Science*) en didactique, terminologie introduite par Norman G. Lederman dans les

années 1990, dans le cadre d'une réflexion sur la dimension épistémologique de l'enseignement et l'apprentissage des sciences, et par conséquent sur l'image que la science véhicule d'elle-même auprès des élèves et des étudiants (cf. le texte de Laurence Maurines dans le présent volume).

Il ne s'agit pas dans cette contribution au présent volume de revenir sur les différentes modalités d'introduction de l'histoire des sciences et les nombreuses réalisations auxquelles elles ont donné lieu ; celles-ci ont en général en commun d'opérer dans un cadre bien défini : les attendus des enseignements sont fixés et délimités par les enjeux actuels de la discipline, et le schéma historique, lorsqu'il est mobilisé, met souvent l'accent sur des points passés à la postérité. Ce que nous interrogeons ici, par le biais d'une analyse historique précise, et dans une posture inversée en quelque sorte, c'est le contenu lui-même des savoirs à enseigner dès lors qu'ils sont précisément éclairés par l'histoire des sciences. L'objectif principal de cette démarche peut être perçu comme étant d'aider l'élève ou l'étudiant à mieux cerner le caractère évolutif de la pensée scientifique, en lui donnant accès à des moments clés de la science en train de se faire, et de le mettre ainsi en position de participer à une phase de création scientifique. Cette mise en situation demande corrélativement à reformuler les méthodes analytiques employées pour résoudre les problématiques posées et les rendre ainsi accessibles à des étudiants contemporains, en leur permettant d'en apprécier les enjeux. Nous illustrerons cette démarche dans les sections II et III à partir de deux exemples importants dans le domaine de la physique : les mouvements planétaires et la théorie de la relativité.

Notre approche s'accompagne d'un positionnement épistémologique spécifique. En effet, dès lors que sont discutés son intérêt pour l'enseignement et ses modalités, l'histoire des sciences n'échappe pas à une mise en relation avec l'épistémologie et la philosophie des sciences. Rappelons très schématiquement que la période moderne a été marquée au XVII^e^ siècle par un courant rationaliste (la raison comme source de connaissance) et un courant empiriste (la connaissance basée sur l'expérience), devenant inductiviste (la théorie comme généralisation issue de l'expérience) au XVIII^e^ siècle ; dans la seconde moitié du XIX^e^ siècle, avec Auguste Comte notamment, apparaît un courant positiviste empreint de la science des ingénieurs (traduisant la notion de progrès) ; dans les

années 1930, le « falsificationisme » de Karl Popper inverse le rôle de l'« expérience cruciale » en mettant l'accent sur l'invalidation des théories plutôt que sur leur confirmation par l'expérience ; puis les « programmes de recherches » de Imre Lakatos dans les années 1960 analysent les mécanismes complexes de survie et d'adaptabilité des théories, jusqu'à leur remplacement lorsqu'elles deviennent « dégénérescentes » du fait d'un recours excessif à des hypothèses *ad hoc* pour englober de nouveaux faits ; une approche plus globale, de type sociologique, est entreprise, à la même période, par Thomas Kuhn (sur laquelle nous reviendrons plus bas). En ce qui nous concerne, nous nous plaçons dans le cadre d'une histoire conceptuelle des sciences, afin de retracer les mécanismes internes d'évolution d'une théorie dans sa dialectique avec l'expérience. Notre approche réintroduit un certain continuisme dans une épistémologie contemporaine traditionnellement marquée par la notion de rupture.

Entre rupture et continuité

Les physiciens français nous semblent plutôt enclins à favoriser (du moins implicitement), notamment à la suite des travaux de Gaston Bachelard ([1934] 2013, [1938] 2004), un regard qu'on pourrait qualifier de « présentiste » sur l'évolution des idées scientifiques. Cela s'observe en particulier à travers la place minime, voire inexistante, que les formations scientifiques consacrent en général dans le curriculum des étudiants de licence et de master à l'histoire des sciences (même si on peut trouver quelques contre-exemples), et à travers l'assimilation de l'histoire des sciences à une simple culture scientifique : l'histoire des sciences n'est pas mobilisée comme pouvant participer à la réflexion scientifique elle-même, mais est, au mieux, conçue comme une forme additionnelle à la transmission des connaissances. Rappelons que l'objectif de Bachelard, qui vivait à une époque ayant vu triompher la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein et la mécanique quantique, était de montrer « que dans le détail des connaissances comme dans la structure générale du savoir, la science physique contemporaine se présente avec une incontestable nouveauté » (Bachelard, [1934] 2013 : 22). Cela l'a conduit à écrire, par exemple, que « c'est le cas, répétons-le, pour la conception einsteinienne dont la richesse et la valeur complexe font soudain apparaître la pauvreté

de la conception newtonienne » (Bachelard, [1934] 2013 : 146). Une trentaine d'années plus tôt, le savant, mathématicien et physicien Henri Poincaré, mettait en garde, par anticipation, à l'égard d'une telle attitude dans l'enseignement, en conclusion de ses conférences consacrées à la « mécanique nouvelle », par exemple lors de sa conférence pour l'Association française pour l'avancement des sciences à Lille :

> Pour conclure, il serait prématuré, je crois, malgré la grande valeur des arguments et des faits érigés contre elle, de regarder la mécanique classique comme définitivement condamnée. Quoi qu'il en soit, d'ailleurs, elle restera la mécanique des vitesses très petites par rapport à la vitesse de la lumière, la mécanique donc de notre vie pratique et de notre technique terrestre. Si cependant, dans quelques années sa rivale triomphe, je me permettrai de vous signaler un écueil pédagogique que n'éviteront pas nombre de maîtres, en France, tout au moins. Ces maîtres n'auront rien de plus pressé, en enseignant la mécanique élémentaire à leurs élèves, que de leur apprendre que cette mécanique-là a fait son temps, qu'une mécanique nouvelle, où les notions de masse et de temps ont une toute autre valeur, la remplace ; ils regarderont de haut cette mécanique périmée que les programmes les forcent à enseigner et feront sentir à leurs élèves le mépris qu'ils lui portent.
>
> Je crois bien cependant que cette mécanique classique dédaignée sera aussi nécessaire que maintenant et que celui qui ne la connaîtra pas à fond ne pourra comprendre la mécanique nouvelle [théorie de la relativité restreinte]. (Poincaré, 1909 : 177)

Les physiciens connaissent aussi globalement l'approche de Kuhn en termes de « paradigmes » (même s'il lui a été reproché de ne pas en avoir donné une définition suffisamment claire). Dans *La structure des révolutions scientifiques* (Kuhn, [1970] 1983), l'auteur met ainsi l'accent sur le rôle de la communauté scientifique dans le processus de validation – d'acceptation par les pairs – d'une théorie. Dans cette perspective plus sociologique, le travail ordinaire d'un chercheur est de pratiquer une « science normale », en ciblant des problèmes types et en utilisant des méthodes de résolution standard dans un cadre théorique établi. Les physiciens évoluent dans ce « paradigme » jusqu'à ce qu'une « anomalie » vienne « contredire les résultats attendus dans le cadre du paradigme qui

gouverne la science normale » (Kuhn, [1970] 1983 : 83). Concernant la théorie de la relativité restreinte, Kuhn nous dit :

> Les études de Maxwell sur le comportement électromagnétique des corps en mouvement ne faisaient pas intervenir l'entraînement de l'éther [le milieu hypothétique de la propagation de la lumière] et il s'avéra très difficile d'introduire cet entraînement dans la théorie. En conséquence, toute une série d'observations antérieures conçues pour déceler le mouvement à travers l'éther parurent anormales. Peu après 1890, on vit donc naître toute une série de tentatives, aussi bien expérimentales que théoriques, pour déceler le mouvement par rapport à l'éther et pour inclure dans la théorie de Maxwell la rigidité de l'éther. Les premières aboutirent uniformément à des échecs […]. Les dernières semblèrent au début plus prometteuses, en particulier celles de Lorentz et Fitzgerald, mais elles mirent en évidence d'autres énigmes et le résultat final fut précisément une prolifération de théories concurrentes qui sont les signes concomitants d'une crise. C'est sur cet arrière-plan historique qu'apparut en 1905 la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. (Kuhn, [1970] 1983 : 110-111)

Cette présentation historique, quelque peu schématique de la période qui a précédé l'émergence de la théorie de la relativité restreinte, autoalimente le fait même que Kuhn veut mettre en évidence : les changements de paradigmes et leur incommensurabilité, à travers des « révolutions », ici avec un avant et un après 1905 distincts. La théorie de la relativité restreinte y apparaît ainsi abruptement, sans lien fort avec ce qui la précède. Pourtant, aux dires même d'Einstein, sa théorie s'inscrit dans une forme de continuité :

> Des exemples du même genre [à l'induction électromagnétique], ainsi que les expériences entreprises pour démontrer le mouvement de la Terre par rapport au « milieu où se propage la lumière » et dont les résultats furent négatifs, font naître la conjecture que ce n'est pas seulement dans la mécanique qu'aucune propriété des phénomènes ne correspond à la notion de mouvement absolu, mais aussi en électrodynamique. Pour tous les systèmes de coordonnées pour lesquels les équations mécaniques restent valables, les lois électrodynamiques et optiques gardent également leur valeur ; c'est ce qui a déjà été démontré pour les grandeurs au premier ordre [en V/c]. (Einstein, [1905] 1925 : 2)

« L'approximation au premier ordre des grandeurs » sera précisément le sujet de notre discussion à la section III consacrée à la relativité. Du point de vue de l'enseignement de la théorie de la relativité, l'introduction de ruptures conceptuelles empêche la mise en place de toute démarche d'enseignement apte à suivre dans les faits le développement de l'esprit scientifique, à un moment particulièrement important : l'enseignant n'a dès lors plus aucun moyen de faire dialoguer les paradigmes entre eux. Les approches bachelardienne et kuhnienne, qui insistent sur des ruptures, introduisent une forme d'étanchéité, de cloisonnement et une relation d'ordre présentiste entre les connaissances, peut-être justifiables d'un point de vue philosophique ou épistémologique, mais qui enferment élèves et étudiants dans des schémas de pensée figés ; dans le champ de l'enseignement, il nous semble que ces approches (implicites dans les programmes) peuvent être considérées comme en partie responsables des échecs répétés de l'introduction de la relativité restreinte dans le secondaire.

Notre objectif est de montrer que l'on peut avoir, dans l'enseignement, un intérêt à revenir à une analyse historique détaillée, plus fidèle, pour concevoir de nouvelles modalités d'apprentissage. Notre approche met l'accent sur de petites évolutions – à défaut de révolutions – que l'on pourrait qualifier de « glissements conceptuels », qui sont autant d'étapes qui se sont avérées nécessaires à l'émergence du nouveau paradigme (alors même que celui-ci n'est pas encore identifié comme tel) et dont la trace se retrouve dans la théorie finale (pour un œil averti). Notre approche réintroduit une composante historique « continuiste » pour apprécier l'évolution des idées scientifiques, beaucoup plus familière aux mathématiciens qu'aux physiciens, qu'Henri Poincaré prenait en compte en ces termes dans *La valeur de la science* :

> Vous avez vu sans doute ces assemblages délicats d'aiguilles siliceuses qui forment le squelette de certaines éponges. Quand la matière organique a disparu, il ne reste qu'une frêle et élégante dentelle. Il n'y a là, il est vrai, que de la silice, mais, ce qui est intéressant, c'est la forme qu'a prise cette silice, et nous ne pouvons la comprendre si nous ne connaissons pas l'éponge vivante qui lui a précisément imprimé cette forme. C'est ainsi que les anciennes notions intuitives de nos pères, même lorsque

> nous les avons abandonnées, impriment encore leur forme aux échafaudages logiques que nous avons mis à leur place […]. (Poincaré, 1904 : 28-29)
>
> Les cadres ne se sont pas brisés parce qu'ils étaient élastiques ; mais ils se sont élargis ; nos pères, qui les avaient établis, n'avaient pas travaillé en vain ; et nous reconnaissons dans la science d'aujourd'hui les traits généraux de l'esquisse qu'ils avaient tracée. (Poincaré, 1904 : 180)

Pour saisir ces petites évolutions, nous devons nous plonger dans des moments cruciaux au cours desquels des étapes intellectuelles décisives se produisent, des moments de création où la connaissance est en train de s'élaborer. Ces « moments » sont en général ignorés par l'enseignement, car ils sont perçus comme des « transitions » ne correspondant qu'à la formulation de « solutions approchées », éphémères et donc indignes d'être enseignées. Or, ce sont précisément ces phases intermédiaires, ces étapes, ces « ponts » entre les connaissances, qui peuvent offrir à l'enseignant la possibilité d'interroger le cadre épistémologique dans lequel il évolue et au pédagogue de renouveler son inspiration. Dans les deux exemples qui suivent, nous allons examiner des solutions approchées au regard des théories admises ultérieurement, dans le sens mathématique d'un développement limité au premier ordre dans les variables pertinentes du problème considéré, ce que nous résumerons par « physique au premier ordre » : l'excentricité *e* pour l'équant de Johannes Kepler au regard de la mécanique newtonienne ; le rapport *V*/*c* de la vitesse de la Terre sur son orbite à la célérité de la lumière dans le vide pour le temps local de Hendrik Antoon Lorentz de 1895 au regard de la théorie de la relativité restreinte. C'est aussi une « physique de l'éphémère », car ces moments n'ont pas eu vocation à perdurer, pour des raisons contingentes : la valeur trop importante de l'excentricité de Mars pour le modèle d'équant qui invalide son utilisation pour toutes les planètes du système solaire imaginée initialement par Kepler ; le passage à la nouvelle expression du temps local de Lorentz en 1904, à laquelle Einstein donnera tout son sens cinématique dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte (Einstein, [1905] 1925), sans faire explicitement référence à la formulation de 1895.

L'intérêt d'une « physique de l'éphémère » : l'équant de Kepler comme lien entre Antiquité et physique moderne

Une étude que nous avons réalisée il y a une dizaine d'années (Bracco & Provost, 2009 ; Bracco, 2010), portant sur l'équant de Kepler, souligne la possibilité d'un enseignement introductif des mouvements planétaires par une analyse « au premier ordre » en l'excentricité *e*, réhabilitant ainsi le modèle d'« équant » utilisé par Kepler de manière transitoire dans son cheminement intellectuel (Kepler, [1609] 1979). L'objectif est d'introduire par ce moyen les trajectoires elliptiques des planètes, en complément des mouvements circulaires usuellement abordés dans les programmes de lycée et de première année de licence. Rappelons-en les traits essentiels.

Historique

Le mouvement apparent des astres dans le ciel avait été « reproduit » dans l'Antiquité à partir de la combinaison de mouvements circulaires et uniformes censés caractériser leur mouvement « naturel ». Inspiré par ce principe, le modèle géocentrique de Claude Ptolémée, le plus sophistiqué, qui a fait foi jusqu'au XVII^e^ siècle, utilise la combinaison de deux cercles, le « déférent » et l'« épicycle », pour reproduire le mouvement d'une planète. Il s'autorise un certain nombre de paramètres *ad hoc*, comme les rayons respectifs des deux cercles, l'excentricité, les vitesses de rotation du centre *E* de l'épicycle sur le déférent et de la planète *P* sur l'épicycle, l'inclinaison et la période d'oscillation du plan de l'épicycle, etc. Mais surtout, Ptolémée introduit, avec l'équant, un nouveau modèle d'excentrique pour le déférent : la rotation du point *E*, centre de l'épicycle, est uniforme non pas par rapport au centre *C* du déférent de rayon *R*, ni même par rapport au point *T* excentrique où est placée la Terre, distant de *eR* du centre *C*, mais par rapport à un point *Q*, symétrique de *T* par rapport à *C* (voir Figure 1).

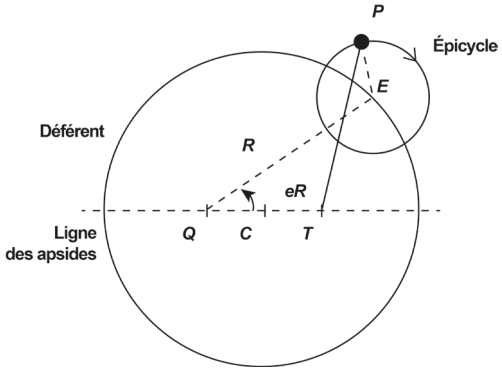


Figure 1 – Épicycle et équant

Source : Réalisation de l'auteur.

Lecture : La Terre est excentrée en T. *La planète* P *circule sur l'épicycle de centre* E *qui décrit le déférent (grand cercle) dans un mouvement uniforme par rapport au point d'équant* Q, *symétrique de* T *par rapport à* C *: l'angle* $\widehat{EQT}$ *croît uniformément au cours du temps.*

Les épicycles ne disparaissent pas avec le modèle héliocentrique de Copernic, bien au contraire. Une des motivations principales de Copernic a été de s'affranchir de l'équant, qu'il jugeait monstrueux car incompatible avec l'idée de mouvement circulaire et uniforme par rapport à un centre (Koestler, 1960 ; Koyré, 1961), ce qui l'amène à recourir à plus d'épicycles que Ptolémée lui-même pour reproduire les mouvements planétaires. Kepler, dans sa défense du système héliocentrique, critique Copernic pour son rejet de l'équant et la multiplication des épicycles. Pourquoi une planète tournerait-elle autour du point *E* « virtuel » ? Ce sont des arguments de dynamique qui guident Kepler : le Soleil doit être le centre d'une force – une sorte de tourbillon – qui entraîne les planètes autour de lui ; c'est lui qui régit dynamiquement les mouvements planétaires.

Kepler, *a contrario* de Copernic, rejette donc les épicycles et généralise l'équant. Il dote, le premier, la Terre elle-même d'un équant dans son mouvement de révolution autour du Soleil (voir Figure 2, p. 136). Il le fait, dans un premier temps, afin de rapporter les données sur Mars

d'un observateur terrestre à un système héliocentrique. En considérant les positions qu'occupe la Terre à trois années martiennes d'intervalle, il détermine le cercle passant par ces trois points et la position excentrée du Soleil, dont le point d'équant Q est symétrique par rapport au centre. Insistons sur le rôle essentiel que joue l'équant dans les travaux de Kepler, qui dit à son sujet dans une note ajoutée rétrospectivement à son ouvrage de jeunesse *Le secret du monde* :

> Mais dans mes *Commentaires sur Mars* j'en ai fait [de l'équant] l'un des éléments principaux de mon livre et je l'ai posé comme une pierre angulaire dans les fondations ; mieux : je l'ai appelé à juste titre la clé de l'astronomie, parce que j'ai démontré, d'une manière évidente à partir des mouvements mêmes de Mars, que le mouvement annuel du Soleil ou de la Terre s'accomplissait autour d'un centre autre que [le sien], celui de l'équant et que l'excentricité de ce mouvement n'était que moitié de celle que lui attribuaient les auteurs. (Kepler, [1621] 1993 : 187)

Kepler envisage alors un système héliocentrique dans lequel les cinq planètes qu'on connaît à son époque décriraient chacune un équant. Si cette tentative a bien failli réussir, c'est que l'équant offre rétrospectivement une perspective de choix : c'est une ellipse approchée ! Plus précisément, quand on passe continûment d'un cercle à une ellipse, par une affinité orthogonale de rapport $\sqrt{1-e^2}$ par rapport à un diamètre du cercle, dans l'approximation $e \ll 1$, le cercle ne se déforme pas au premier ordre en e (le rapport précédent vaut 1), mais son centre se subdivise en deux foyers distincts à ce même ordre, symétriques, distants de eR du centre C : les points Q et S.

Vers les propriétés des mouvements elliptiques à partir de l'équant

L'équant permet ainsi d'établir très facilement les deux premières lois de Kepler à cet ordre d'approximation (trajectoire elliptique et loi des aires) et, avec quelques subtilités, la troisième (loi des périodes). Nous n'illustrerons ici que les deux premières à partir d'un calcul moderne s'éloignant de la démarche historique de façon à le rendre utilisable par des élèves et des étudiants d'aujourd'hui.

Sur la figure 2, la planète *P* décrit le cercle de centre *C* et de rayon *R*. Son mouvement est défini par la rotation uniforme *QP* autour du point équant *Q*, d'angle φ et de pulsation constante *ω*. Le Soleil est en *S* tel que $CS = eR$, où *e* est l'excentricité. Le modèle d'équant se résume donc à :

$$QC = CS = eR \; ; \; \varphi = \omega t \; ; \; \omega = cste \quad (1)$$

Les angles θ_0 et θ repèrent la position de la planète par rapport à l'axe *x* (ligne des apsides de plus ou moins grande distance par rapport au soleil). Les angles sous lesquels *QC* et *CS* sont vus de la planète *P* sont petits et égaux à $e\sin\theta_0$ (conséquence des relations $SH = QH' = eR\sin\theta_0$). La somme des angles des triangles *SPC* et *CPQ* valant π, on en déduit les relations entre les angles θ_0, θ et φ :

$$\theta = \theta_0 + e\sin\theta_0 \; ; \; \varphi = \theta_0 - e\sin\theta_0 \quad (2)$$

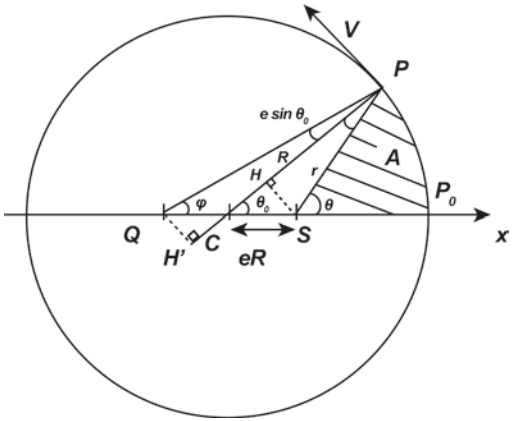


Figure 2 – Paramètres du modèle d'équant de rayon *R* et d'excentricité *e*

Source : Réalisation de l'auteur (Bracco, 2010).

Lecture : φ croît uniformément avec le temps. La planète est en P. *Le soleil en* S *occupe une position excentrée ;* Q *est symétrique de* S *par rapport au centre* C.

L'équant, une ellipse au premier ordre

Déterminons les propriétés de la trajectoire au premier ordre en *e*. Des relations (calcul classique en physique) $CH = CH' = eR\cos\theta_0$, on déduit que :

$$SP = r = R(1 - e\cos\theta_0) \; ; \; QP = R(1 + e\cos\theta_0) \quad (3)$$

La somme des distances $SP + QP$ est donc constante (égale ici à $2R$). Or, une ellipse est précisément définie par la valeur constante de la somme des distances d'un de ses points à deux points fixes (ses foyers) : au premier ordre en *e*, l'équant est donc une ellipse de foyers *Q* et *S*.

La loi des aires sur l'équant

L'aire *A* du secteur angulaire P_0SP (voir Figure 2) est la différence entre celle de $P_0CP \left(= R^2\theta_0/2\right)$ et celle du triangle $SCP \left(= SH \times CP/2 = R^2 e\sin\theta_0/2\right)$. D'où, en utilisant les relations (2) :

$$A = \frac{R^2}{2}(\theta_0 - e\sin\theta_0) = \frac{R^2\varphi}{2} \quad (4)$$

Puisque φ croît uniformément avec le temps (par la définition (1) de l'équant), l'aire balayée par *SP* est donc proportionnelle au temps. Dans un petit intervalle de temps Δt, elle vaut :

$$\Delta A = \frac{K\Delta t}{2}, \text{ avec } K = R^2\omega \quad (5)$$

La constante *K* est la constante des aires. Il apparaît ainsi qu'au premier ordre en *e* l'équant constitue une modification du mouvement circulaire cohérente du point de vue cinématique pour décrire les mouvements planétaires.

Si le modèle d'équant sans épicycle, introduit par Kepler pour décrire les mouvements planétaires dans le système héliocentrique, n'est pas passé à la postérité, c'est qu'il a été d'emblée tenu en échec par l'objet d'étude même que se fixait Kepler à la suite des mesures précises de Tycho Brahe : la détermination de l'orbite de Mars. En effet, l'excentricité de Mars est telle (0,09) qu'à la précision des mesures de Brahe, le modèle d'équant est

lui-même pris en défaut, entraînant Kepler dans des modifications *ad hoc* sans fin, avant de parvenir à sa solution elliptique[1].

On constate, rétrospectivement, à travers cette courte discussion, que l'équant est le « pont » qui, au premier ordre en l'excentricité *e*, relie les connaissances élaborées dans le cadre du géocentrisme antique aux connaissances « modernes » développées dans le cadre de l'héliocentrisme. À ce titre, il mérite sa place dans l'enseignement, entre le cercle et l'ellipse, en permettant à l'étudiant de se sensibiliser à d'autres trajectoires que les trajectoires circulaires et uniformes auxquelles il est usuellement confronté. De ce point de vue, l'histoire des sciences telle qu'elle est mobilisée par Holton (1952), y compris dans une approche dite « intégratrice », n'apporte rien de radicalement nouveau, puisque seule la trajectoire circulaire reste abordée. La proposition que nous faisons va au-delà en préparant l'étudiant à mieux comprendre la nature elliptique des trajectoires planétaires.

Dans un autre domaine, les transformations introduites par Lorentz en 1895, qui conduisent à ce que nous appelons une « relativité au premier ordre », ont été quelque peu oubliées, en particulier dans l'enseignement et par les épistémologues et philosophes des sciences. Pourtant, leur intérêt est manifeste, comme nous allons le voir, y compris dès l'enseignement secondaire.

L'intérêt d'une « physique de l'éphémère » : le temps local de Lorentz de 1895 comme lien entre théorie électrodynamique et relativité restreinte

Historique

Commençons tout d'abord par un bref rappel historique. C'est Augustin Fresnel en 1818 qui réalise « que le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente » (Fresnel, 1868 : 633). Il parvient à cette conclusion importante par son explication de l'expérience du prisme de François Arago. Arago s'attendait en effet à ce que, dans une

[1] Notons que cela permet au passage de discuter avec les élèves du lien entre théorie et expérience dans le cadre de la *NoS*.

théorie corpusculaire de la lumière, du fait du mouvement de la Terre, les rayons lumineux à la sortie d'un prisme placé devant une lunette astronomique connaissent une déviation modulée par le mouvement orbital (ou diurne) de la Terre ; mais il ne l'observe pas. Fresnel donne une explication dans le cadre de la théorie ondulatoire sur la base d'une compensation : il postule que la vitesse, par rapport à l'éther (support hypothétique des ondes lumineuses), de la lumière dans le prisme en mouvement, prend une valeur spécifique, différente de celle dans le prisme au repos, qu'il détermine pour que la déviation induite des rayons compense exactement l'effet d'aberration stellaire[2] (cf. par exemple : Bracco & Provost, 2014 ; Darrigol, 2022). La nouvelle expression de la vitesse, donnée par Fresnel, est connue depuis sous le nom de « formule de Fresnel » ou de « coefficient de Fresnel » (interprétée alors comme un entraînement « partiel » de l'éther) et a été vérifiée expérimentalement par Hippolyte Fizeau (1851). Elle sera interprétée après 1905 comme une nouvelle cinématique : la formule de Fresnel correspond en fait au premier ordre d'approximation en V/c de la cinématique relativiste (ce qu'explicitera Max von Laue en 1907, voir équation (9)).

Le temps local comme variable mathématique

Avec James Clerk Maxwell, la lumière devient une onde électromagnétique transversale et l'expérience du prisme d'Arago le prototype de l'électrodynamique des corps en mouvement (Darrigol, 2000, 2022), pour laquelle Lorentz, Poincaré et Einstein vont apporter des contributions décisives entre 1895 et 1905. Lorentz généralise ainsi la conclusion de Fresnel à un ensemble d'expériences électrostatique, magnétostatique et plus généralement électromagnétiques (et optiques) pour lesquelles le mouvement de la Terre dans l'éther ne peut être mis en évidence ; une douzaine d'expériences de ce type sont alors connues à la fin du XIX^e^ siècle. Il développe pour rendre compte des résultats négatifs de ces expériences sa « théorie

[2] Cet effet indique qu'une étoile n'est pas observée dans sa vraie direction en raison du mouvement de l'observateur. Il n'est qu'une conséquence de la vitesse finie de propagation de la lumière en provenance de l'étoile, qui se compose avec celle de la Terre, indépendamment de toute idée sur la nature de la lumière (corpusculaire ou ondulatoire), comme Fresnel l'avait montré dès 1814.

des états correspondants » (Lorentz, 1895), qui repose sur l'idée simple que les équations de l'électromagnétisme de Maxwell décrivant ces phénomènes s'écrivent de la même manière pour un système en mouvement à la vitesse V (dans la direction des x) dans l'éther que pour ce même système ramené au repos, dans un changement de variable sur les coordonnées et les champs qui fait passer du mouvement au repos. Il faut bien sûr prendre en compte le changement de variable galiléen habituel :

$$x' = x - Vt \quad (6)$$

qui décrit l'entraînement à la vitesse V du système physique dans un référentiel immobile (l'éther). En mécanique newtonienne, le temps est « absolu » et l'égalité implicite $t' = t$ entraîne (par dérivation par rapport au temps), à partir de la relation sur x' décrite ci-dessus, la loi de composition galiléenne des vitesses $v' = v - V$ et l'égalité des accélérations $a' = a$. Lorentz utilise le changement de variable (6) pour réécrire les équations du champ électromagnétique de Maxwell (équations différentielles). Sa « théorie des états correspondants » demande à réécrire les dérivées de fonctions composées par rapport aux variables x' et t', à les exprimer dans les équations et à regrouper les termes qui se ressemblent pour établir les transformations des champs électriques et magnétiques. Au bout de cette démarche, subsiste cependant un terme qui empêche une identification complète des équations représentant les inductions électrique et magnétique, à moins de reconsidérer, comme le fait Lorentz, le changement de variable initial sur le temps, auquel il revient de donner la forme :

$$t' = t - Vx/c^2 \quad (7)$$

Cette variable t' n'est alors pas un véritable temps pour Lorentz, au même sens que le temps absolu t, mais une variable « fictive » marquée par son obtention mathématique, qu'il appelle *temps local* du fait de sa dépendance avec la position x. Nous verrons ci-dessous qu'en 1900, Poincaré lui donne un sens physique. Ce temps local est cependant à distinguer de celui que Lorentz introduit en 1904 (aussi appelé *temps local*) qui conduira Poincaré et Einstein à l'écriture des « transformations de Lorentz » avec $t' = (t - Vx/c^2)/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ (Poincaré, 1905 ; Einstein, [1905] 1925). Le sens à

donner à ce dernier est déterminant pour Einstein, qui dira rétrospectivement en 1907 en préambule de son article de revue sur la théorie de la relativité :

> Il suffisait de se rendre compte qu'une grandeur auxiliaire introduite par H. A. Lorentz et nommé par lui temps local pourrait être défini comme le temps en général. (Einstein, 1989 : 253 ; notre traduction)

Le temps local de 1895 (équation (7)) est une « approximation au premier ordre » en V/c de l'expression de 1904-1905 décrite ci-dessus. Pour l'enseignement, même si ces éléments de contexte historique (Darrigol, 2022 ; Bracco & Provost, 2022) peuvent être rappelés, notre véritable but ici est d'insister sur la richesse de la notion de temps local de 1895, tout d'abord en revenant à son interprétation historique par Poincaré.

Le temps local, un temps physique

Dans son article intitulé « La théorie de Lorentz et le principe de réaction », Poincaré (1900) examine les conditions de compatibilité de la théorie électrodynamique de Lorentz avec les grands principes de la physique issus de la mécanique (principe de l'égalité de l'action et de la réaction, principe de relativité), à l'égard desquels bon nombre de physiciens (au premier rang desquels Lorentz et Paul Langevin) sont sceptiques concernant leur extension à l'électrodynamique, hors du champ de la mécanique des corps matériels. C'est dans la troisième et dernière section de son article que Poincaré interprète le *temps local* de Lorentz comme étant le temps indiqué par les montres de deux observateurs distants l'un de l'autre [de l], qui ont synchronisé leurs montres par des signaux lumineux, ignorant leur mouvement de translation dans l'éther :

> Je suppose que des observateurs placés en différents points, règlent leurs montres à l'aide de signaux lumineux ; qu'ils cherchent à corriger ces signaux du temps de la transmission, mais qu'ignorant le mouvement de translation dont ils sont animés et croyant par conséquent que les signaux se transmettent également vite dans les deux sens, ils se bornent à croiser les observations, en envoyant un signal de A en B, puis un autre de B en A. Le temps local t' est le temps marqué par les montres ainsi réglées.

Une démonstration simple est la suivante : *B*, à la distance *l* de *A*, reçoit à l'instant $t'_B = l/c$ le signal envoyé par *A* à l'instant $t'_A = 0$, puisque, pour ces observateurs, la célérité de la lumière est *c*, comme s'ils étaient au repos dans l'éther. Dans le référentiel « au repos » (l'éther), l'émission a eu lieu en *a* à l'instant $t_a = 0$ en $x_a = 0$, mais *B* fuit alors *A* à la vitesse *V* et reçoit ainsi le signal en $x_b = l + Vt$. Dans ce même référentiel, cette distance est aussi *ct* puisque la lumière se propage à la célérité *c*. Par substitution (en écrivant $l = ct'$, $t = x/c$) dans l'expression de x_b, on obtient directement l'expression $t' = t - Vx/c^2$ indiquée par la montre des observateurs en mouvement par rapport à celle d'observateurs au repos dans l'éther (voir Figure 3).

Poincaré reviendra lui-même sur le temps local comme conséquence d'un processus de synchronisation de montres par échange de signaux lumineux dans sa conférence de Saint-Louis (États-Unis) en 1904, publiée dans *La valeur de la science* (Poincaré 1904) ; un procédé de synchronisation d'horloges analogue sera utilisé par Einstein en 1905 (Darrigol, 2004), mais de façon générale, à tout ordre.

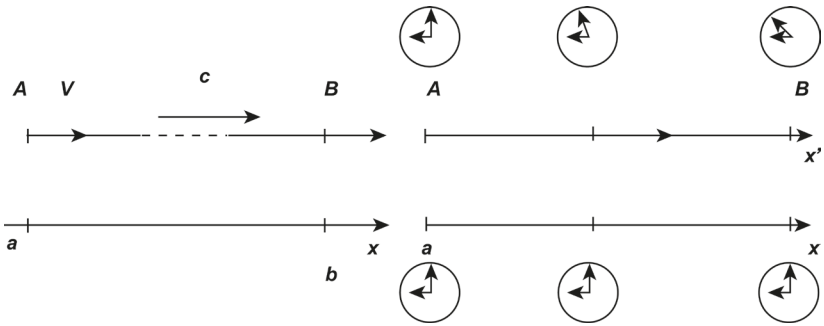


Figure 3 – Lecture dans *R* à un instant *t* des montres synchronisées dans *R'*

Source : Réalisation de l'auteur, d'après Bracco & Provost ; 2014.

Cette relation sur *t'* est également importante pour la discussion de la relativité de la simultanéité, car, pour des intervalles, elle conduit à écrire :

$$\Delta t' = \Delta t - V\Delta x/c^2$$

Si $\Delta t = 0$ dans un référentiel R, alors $\Delta t' \neq 0$ en général dans R' en translation uniforme à la vitesse V par rapport à R (en effet, pour deux évènements distincts : $\Delta x \neq 0$). Cette conséquence est discutée par Poincaré (sans référence explicite au temps local) dans le texte philosophique bien connu *La science et l'hypothèse* (Poincaré, [1902] 1968) : « Non seulement nous n'avons pas l'intuition directe de l'égalité de deux durées, mais nous n'avons même pas celle de la simultanéité de deux événements qui se produisent sur des théâtres différents. »

La théorie ultérieure de la relativité restreinte et l'apport d'Einstein dans son article « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » (Einstein, [1905] 1925), qui place au centre de son approche la cinématique avec la discussion générale des processus de mesure de durées et de longueurs en les rendant explicitement relatives à l'observateur (et ce à tout ordre), sont mieux connus des enseignants que ce qui précède, du moins quand ils ont eux-mêmes reçu un enseignement sur la théorie de la relativité dans leur cursus universitaire. Mais, pour l'enseignement en terminale ou en première année de licence, il semble pertinent, avant d'enseigner des faits marquants de la relativité d'Einstein, de revenir sur ces transformations « au premier ordre » qui ont constitué un passage éphémère vers la relativité restreinte. Outre leur intérêt historique propre, un des aspects que nous détaillons ci-dessous pour souligner tout leur potentiel est le fait que, constituant les transformations infinitésimales du groupe de Lorentz (comme Poincaré s'en rend compte rétrospectivement en 1905), elles permettent de retrouver les effets célèbres de la relativité restreinte (contraction des longueurs et dilatation des durées).

Pistes inexploitées ou inexplorées vers la cinématique relativiste

Pour obtenir simplement l'expression (7) du temps local de 1895, partons de l'équation (6) $x' = x - Vt$, connue des étudiants et qui peut être mise à portée d'élèves du secondaire, traduisant l'entraînement de l'origine O' du référentiel R' (coordonnées (x', t')) à la vitesse V par rapport à un référentiel galiléen R (coordonnées (x, t)). Mettons-la en relation avec la propagation d'un flash lumineux selon l'axe des x à la célérité c dans le référentiel R (voir Figure 4) : $x = ct$, en notant $t = 0$ l'instant de son émission à l'origine O de R. En supposant l'invariance de c, l'équation de

propagation du flash lumineux dans *R'* en translation rectiligne et uniforme à la vitesse *V* dans *R* est $x' = ct'$ (les origines de *R* et *R'* coïncidant à $t = t' = 0$).

Remplaçant alors dans l'équation d'entraînement (6) *x'* par *ct'*, *x* par *ct* et *t* par *x/c*, on obtient immédiatement l'expression (7) du temps local[3] : $t' = t - Vx/c^2$.

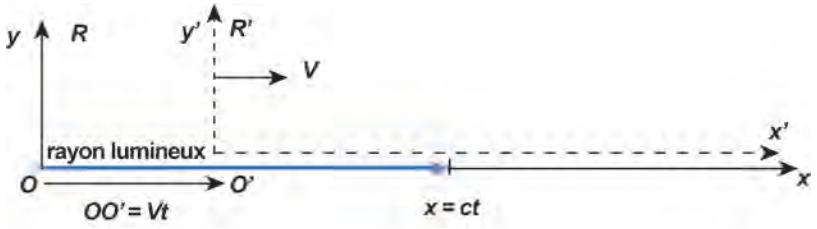


Figure 4 – Rayon lumineux dans *R* et *R'* ; vitesse de la lumière *c* invariante

Source : Réalisation de l'auteur.

La méthode suivie est assez proche de celle employée par Max Abraham dans son manuel à l'attention des étudiants (Abraham, 1905).

Il est dès lors possible d'établir une nouvelle cinématique. En formant le quotient des variations sur *x'* et *t'* à partir des relations (6) et (7), on trouve une loi de composition relativiste des vitesses différente de la loi galiléenne – qui se trouve être la loi relativiste générale valable à tout ordre –, mais qui, en toute rigueur, n'est obtenue ici qu'au premier ordre en *V/c* et doit être mise sous la forme :

$$v' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{v - V}{1 - vV/c^2} \sim v - V(1 - v^2/c^2) \quad (8)$$

---

[3] Remarquons au passage la symétrie qui s'introduit sur les grandeurs d'espace et de temps : si l'on mesure les distances par le temps de parcours de la lumière en prenant la vitesse de la lumière comme unité ($c = 1$), comme le font les physiciens théoriciens aujourd'hui, alors les relations ci-dessus s'écrivent :
$x' = x - Vt$, $t' = t - Vx$
Les vitesses s'expriment alors comme des nombres inférieurs à 1 et on restitue *c* dans les équations par une analyse dimensionnelle.

Exprimons v en fonction de v' en échangeant les rôles des variables avec et sans prime et V en $-V$: pour un milieu réfringent dans lequel la vitesse de la lumière est $v' = c/n$ quand il est au repos (prisme d'Arago), on obtient la formule de Fresnel (évoquée dans l'introduction de cette section) :

$$v = c/n + V(1 - 1/n^2) \quad (9)$$

On peut bien sûr vérifier que l'on retrouve à partir de la relation (8) l'invariance de la célérité de la lumière dans le vide (ici au premier ordre en V/c) : $c' = c$.

Nous allons établir que la contraction des longueurs et la dilatation des durées de la relativité restreinte apparaissent aussi comme des conséquences des transformations de Lorentz de 1895. Ce fait est très peu connu (Provost & Bracco, 2016) et remarquable. Il est lié au caractère infinitésimal des transformations de 1895 (voir plus haut) dans leur lien avec le groupe de Lorentz.

Contraction des longueurs de la relativité restreinte

Pour établir la contraction des longueurs, il nous faut considérer une règle en mouvement à la vitesse v quelconque (pas nécessairement petite devant c) dans le référentiel R où sa longueur est l. Le plus simple est de la caractériser par le fait que l'ensemble de ses points vérifie dans R la relation :

$$0 < x - vt < l \quad (10)$$

et dans R' la relation analogue :

$$0 < x' - v't' < l' \quad (11)$$

où l' est sa longueur dans R' (Provost & Bracco, 2016). En exprimant x et t en fonction de x' et t' avec les relations (6) et (7), soit $x = x' + Vt'$, $t = t' + Vx'/c^2$ dans (10), on obtient en regroupant les termes :

$$0 < x'\left(1 - \frac{vV}{c^2}\right) - (v - V)t' < l \text{ soit } 0 < x' - \frac{v - V}{1 - vV/c^2}t' < l\left(1 + \frac{vV}{c^2}\right)$$

(et avec un développement limité au premier ordre pour le dernier terme). En identifiant à (11), on trouve l'expression de la longueur l' dans R' au premier ordre :

$$l' = l(1 + vV/c^2) \quad (12)$$

et, au passage, on retrouve la relation (8) pour *v'*. Le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe ci-jointe pour une démonstration complémentaire.

Faisons apparaître le caractère infinitésimal des variations de vitesse et de longueur, du fait que $V \ll c$, en notant $\delta v = v' - v$ et $\delta l = l' - l$. Les relations (8) et (12) permettent d'écrire :

$$\delta v = -V(1 - v^2/c^2),\ \delta l = Vvl/c^2 \quad (13)$$

Par élimination de V et passage aux différentielles, on obtient l'équation exprimant la variation de l en fonction de v :

$$\frac{dl}{l} = -\frac{vdv/c^2}{1 - v^2/c^2} = \frac{1}{2} \times \frac{(-2vdv/c^2)}{1 - v^2/c^2} \quad (14)$$

où l'on reconnaît l'expression des dérivées logarithmiques de l et de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. En intégrant v entre 0 et v, et L entre L_0 (longueur de la règle dans le référentiel propre où la règle est en repos, $v = 0$) et L, on obtient :

$$L = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (15)$$

traduisant la contraction des longueurs. Cette opération d'intégration revient à composer entre elles une infinité de transformations infinitésimales pour obtenir une transformation finie entre la situation où la règle est au repos et celle où elle a une vitesse v quelconque. Pour éviter d'avoir recours à une intégration, on peut aussi repérer un invariant (Provost & Bracco, 2016).

Dilatation des durées de la relativité restreinte

Pendant une durée Δt dans R, une horloge mobile à la vitesse v se déplace entre deux points de ce référentiel d'une distance $\Delta x = v\Delta t$. Dans *R'*, animé de la vitesse de translation $V \ll c$ par rapport à R, la durée correspondante écoulée $\Delta t'$ est, d'après (7) :

$$\Delta t' = \Delta t - V\Delta x/c^2 = (1 - vV/c^2)\Delta t \quad (16)$$

Cette relation est, au signe près, analogue à la relation (12) sur les longueurs. Un calcul similaire au précédent conduit à :

$$\delta v = -V(1-v^2/c^2),\ \delta(\Delta t) = -Vv\Delta t/c^2 \quad (17)$$

Dans l'élimination de V, l'apparition d'un signe « - » par rapport au calcul précédent amène à la dérivée logarithmique de $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ et, en intégrant, à :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (18)$$

où Δt_0 est la durée écoulée dans le référentiel propre de l'horloge ($v = 0$).

Nous avons vu dans ce qui précède que le temps local, introduit par Lorentz dans sa première version en 1895, valable au premier ordre en V/c, peut être établi par un processus de synchronisation qui sera déterminant pour la relativité restreinte. Il permet aussi de discuter la relativité de la simultanéité, de définir une nouvelle cinématique et d'obtenir les effets de la relativité restreinte (contraction des longueurs et dilatation des durées).

Tout comme l'équant peut être vu comme un passage intermédiaire pour élargir le champ de connaissance des étudiants en dehors du mouvement circulaire et uniforme, et introduire la notion de trajectoire elliptique, le temps local de Lorentz de 1895 marque le passage vers le caractère relatif du temps, dès lors qu'on le considère comme un vrai temps indiqué par des montres d'observateurs, qui n'est plus le même pour tout observateur et en tout lieu, contrairement au temps absolu et mathématique newtonien.

Conclusion

Quand on porte un regard historique précis sur des moments clés qui ont permis des avancées conceptuelles en physique, on est frappé par le fait que des facteurs essentiels à l'évolution des idées se cachent dans ce que l'on pourrait appeler de « petits glissements conceptuels », introduits pour essayer de mettre en accord théorie et observation à l'aide d'outils déjà existants (comme l'équant, emprunté au contexte géocentrique) ou introduits spécifiquement (comme le temps local de Lorentz de 1895). Les théories « éphémères » associées (un modèle héliocentrique avec équants pour Kepler, la théorie des états correspondants de Lorentz de 1895) peuvent être vues rétrospectivement comme des approximations (au premier ordre) des solutions « exactes » données par les théories

« finalisées » que sont respectivement la dynamique newtonienne et la relativité restreinte. Si l'on ne s'en tient qu'à ces dernières, comme le fait l'enseignement, on perd tout fil conducteur entre les connaissances qui précèdent l'émergence de la nouvelle théorie physique et le nouveau paradigme qu'elle représente par la suite. Cette rupture empêche d'amener élèves et étudiants à de nouvelles connaissances de manière progressive. Au contraire, faire une place dans l'enseignement à cette « physique de l'éphémère », « approximative » au regard des connaissances « exactes », permet à l'élève (ou à l'étudiant) de se sentir un peu chercheur lui-même en participant au processus créatif. Notre démarche participe donc à un mouvement plus large, qui nous rapproche du point de vue qu'exprimait Maxwell sur la comparaison des approches d'André-Marie Ampère et de Michael Faraday de l'électrodynamique :

> L'étude expérimentale par laquelle Ampère a établi les lois de l'action mécanique qui s'exerce entre des courants électriques constitue un des plus brillants exploits de la Science. Il semble que cet ensemble de théorie et d'expérience ait jailli dans toute sa puissance, avec toutes ses armes, du cerveau du Newton de l'électricité. La forme en est parfaite, la rigueur inattaquable, et le tout se résume en une formule, d'où peuvent se déduire tous les phénomènes et qui devra toujours rester la formule fondamentale de l'Électrodynamique [pour nous, le parallèle porte sur la relativité d'Einstein de 1905].
>
> Mais la méthode d'Ampère, quoique revêtant une forme inductive, ne nous permet pas de suivre l'enchaînement des idées qui lui ont servi de guide. Nous avons peine à croire qu'Ampère ait réellement découvert la loi de l'action au moyen des expériences qu'il décrit. Nous sommes conduits à soupçonner, ce que d'ailleurs il nous dit lui-même, qu'il a découvert la loi par quelque méthode qu'il ne nous montre pas, et qu'ayant ensuite édifié une démonstration parfaite, il a fait disparaître toutes les traces des échafaudages au moyen desquels il l'avait élevée[4].
>
> Au contraire, Faraday nous montre toutes ses expériences, celles qui réussissent et celles qui ne réussissent pas, ses idées à l'état d'ébauche et à celui de complet développement ; et

[4] Pour une analyse de la démarche scientifique « duale » d'Ampère, nous renvoyons à : Blondel, 1989.

> le lecteur, si inférieur qu'il soit à Faraday comme puissance d'induction, éprouve de la sympathie plus encore que de l'admiration, et se sent tenté de croire que, lui aussi, s'il en avait l'occasion, ferait des découvertes [le parallèle porterait pour nous plutôt sur les travaux de Lorentz,1895 et Poincaré, 1900]. Quiconque étudie, devra donc lire les *Recherches* d'Ampère, comme un magnifique modèle de style scientifique, dans l'exposé d'une découverte ; mais il devra aussi étudier Faraday, en vue de cultiver les tendances scientifiques de son esprit par l'action et la réaction qui s'y établiront entre les faits nouvellement découverts, tels que les lui présente Faraday, et les idées qui naissent dans son propre esprit. (Maxwell, [1873] 1885-1887 : Tome II, chapitre 3)

Les propositions que nous avons faites pour introduire les mouvements elliptiques et la relativité restreinte demandent à être testées en classe, au niveau de la terminale ou de la première année à l'université. Elles requièrent, d'une part, l'élaboration de séances d'enseignement spécifiques et, d'autre part, l'utilisation d'outils adaptés pour mesurer leur efficacité d'un point de vue didactique. L'un des points essentiels qui est questionné est celui de l'élaboration des savoirs scientifiques. Nous faisons l'hypothèse qu'introduire « une physique de l'éphémère », mettant en valeur des moments transitoires et pourtant clés dans l'évolution de la pensée scientifique, est susceptible d'aider élèves et étudiants dans leur compréhension et leur maîtrise des concepts scientifiques, grâce à une meilleure appréhension des processus créatifs en science.

Références bibliographiques

Abraham Max, 1905. « Die Lichtzeit in einem gleichförmig bewegten System », *Theorie der Elektrizität. Zweiter Band: Elektromagnetische Theorie der Strahlung*, Leipzig, Teubner, p. 366-373.

Bachelard Gaston, [1934] 2013. *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Presses universitaires de France.

Bachelard Gaston, [1938] 2004. *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance*, Paris, Vrin.

Blondel Christine, 1989. « Vision physique “éthérienne”, mathématisation “laplacienne” : l’électrodynamique d’Ampère », *Revue d’histoire des sciences*, 42 (1-2), p. 123-137, https://doi.org/10.3406/rhs.1989.4137.

Bracco Christian, 2010. *Histoire et enseignement de la physique : lumière, planètes, relativité et quanta*, Habilitation à diriger des recherches, École normale supérieure de Cachan, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00529686/ (consulté le 03/04/2024).

Bracco Christian & Provost Jean-Pierre, 2009. « Had the Planet Mars not Existed: Kepler’s Equant Model and its Physical Consequences », *European Journal of Physics*, 30 (5), p. 1085-1092, https://doi.org/ 10.1088/0143-0807/30/5/015.

Bracco Christian & Provost Jean-Pierre, 2014. « La relativité d’Einstein au premier ordre en *V/c*. Remarques pédagogiques et historiques », *Le Bup. Bulletin de l’Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 108 (963), p. 533-546.

Bracco Christian & Provost Jean-Pierre, 2022. « First-order Relativity: From Fresnel’s 1818 “Drag” Coefficient to Lorentz’s 1895 “Local Time” Followed by Poincaré’s 1900 Interpretation, and Finally Up to Einstein’s 1911-1912 Spatially Flat Metric », *Almagest. International Journal for the History of Scientific Ideas*, 13 (2), p. 96-111, https://doi.org/10.1484/J.ALMAGEST.5.132478.

Darrigol Olivier, 2004. « The Mystery of the Einstein-Poincaré Connection », *Isis*, 95 (4), p. 614-626, https://doi.org/10.1086/430652.

Darrigol Olivier, 2000. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford, Oxford University Press.

Darrigol Olivier, 2022. *Relativity Principles and Theories from Galileo to Einstein*, Oxford, Oxford University Press.

Einstein Albert, [1905] 1925. *Sur l’électrodynamique des corps en mouvement*, trad. M. Solovine, Paris, Gauthier-Villars.

Einstein Albert, 1989. « On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn from it [1907]», *The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, transl. A. Beck, Princeton, Princeton University Press, p. 252-311.

Fizeau Hippolyte, 1851. « Sur les hypothèses relatives à l’éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des sciences*, 33 (13), p. 349-355.

Fresnel Augustin, 1868. « Lettre à François Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique [1818] », *Œuvres complètes*, Tome II, éd. H. de Sénarmont, É. Verdet & L. Fresnel, Paris, Imprimerie Impériale, p. 627-636.

Holton Gerald 1952. *Introduction to Concepts and Theories in physical Science*, Reading, Addison-Wesley.

Holton Gerald, 2003. « The Project Physics Course, Then and Now », *Science & Education*, 12 (8), p. 779-786, https://doi.org/10.1023/B:SCED.0000004544.55635.40.

Heilbron John L., 1987. « Applied History of Science», *Isis*, 78 (4), p. 552-563, https://doi.org/10.1086/354552.

Kepler Jean, [1609] 1979. *Astronomie nouvelle*, trad. J. Peyroux, Paris, Albert Blanchard.

Kepler Jean, [1621] 1993. *Le secret du monde*, trad. et notes A. Seconds, Paris, Gallimard.

Khun Thomas, [1970] 1983. *La structure des révolutions scientifiques*, trad. L. Meyer, Paris, Flammarion.

Koestler Arthur, 1960. *Les somnambules. Essai sur l'histoire des conceptions de l'Univers,* trad. G. Fradier, Paris, Calmann-Lévy.

Koyré Alexandre, 1961. *La révolution astronomique. Copernic, Kepler, Borelli*, Paris, Hermann.

Lorentz Hendrik-Antoon, 1895. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpen*, Leiden, Brill.

Maxwell James Clerck, [1873] 1885-1887. *Traité d'électricité et de magnétisme*, trad. G. Séligmann-Lui, 2 volumes, Paris, Gauthier-Villars.

Matthews Michael R., 1994. *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*, New York/London, Routledge.

Poincaré Henri, 1900. « La théorie de Lorentz et le principe de réaction », *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5, p. 252-278.

Poincaré Henri, [1902] 1968. *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion.

Poincaré Henri, 1904. *La valeur de la science*, Paris, Flammarion.

Poincaré Henri, 1905. « Sur la dynamique de l'électron », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 140 (23), p. 1504-1508.

Poincaré Henri, 1909. « La mécanique nouvelle », *Revue scientifique*, 12, p. 170-177.

Provost Jean-Pierre & Bracco Christian, 2016. « The 1895 Lorentz Transformations: Historical Issues and Present Teaching », *European Journal of Physics,* 37 (4), art. 045601, https://doi.org/10.1088/0143-0807/37/4/045601.

Rutherford F. James, Holton Gerald, Watson Fletcher G & Ahlgren Andrew, 1971-1972. *HPP* (*Harvard Project Physics). Texte et guide de travail*, 4 volumes, New York/Paris, Holt Rinehart and Winston/Diffusion Vuibert.

Annexe

Documentation complémentaire pour l'enseignant

Transformation des longueurs par une transformation de Lorentz infinitésimale

P. Teyssandier

(Doc. de travail : 16/09/2019)

Problème. – On se donne un référentiel inertiel $\mathcal{R}$ rapporté à un système d'axes orthonormés (Ox, Oy, Oz). On considère une règle glissant sur l'axe Ox avec la vitesse constante V par rapport à $\mathcal{R}$. On appelle L la longueur de la règle mesurée dans $\mathcal{R}$. Quelle est la longueur L' de cette règle mesurée dans un référentiel inertiel $\mathcal{R}'$ se mouvant le long de l'axe Ox avec une vitesse infiniment petite ε, les axes $O'y'$ et $O'z'$ restant respectivement parallèles à Oy et à Oz ? On admet que les formules de transformation entre $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ sont des transformations de Lorentz du premier ordre en ε données par

$$t' = t - \varepsilon x, \tag{1}$$

$$x' = x - \varepsilon t, \tag{2}$$

où on a posé $c = 1$, et supposé que O et O' coïncident à l'instant $t = 0$.

On appelle A et B les extrémités de la règle. La longueur d'une règle dans un référentiel inertiel $\mathcal{R}$ arbitraire *à une date t donnée de ce référentiel* est *par définition* la distance entre les positions de A et de B à l'instant t telle qu'elle est mesurée dans $\mathcal{R}$. En conséquence, dire que la règle a une longueur L dans $\mathcal{R}$ revient à supposer que les équations horaires de A et de B sont respectivement (on suppose que A coïncide avec O en $t = 0$) :

$$x_A = Vt \tag{3}$$

et

$$x_B = Vt + L. \tag{4}$$

Les formules (1) et (2) étant linéaires, les équations horaires de A et de B dans le référentiel $\mathcal{R}'$ sont de la forme

$$x'_A = V't' \tag{5}$$

et

$$x'_B = V't' + L', \tag{6}$$

où V' et L' sont des constantes. Il est clair que *par définition*, ces constantes sont respectivement la vitesse et la longueur de la règle dans $\mathcal{R}'$. Pour les déterminer, il suffit d'inverser les formules de transformation de Lorentz. On a en négligeant les termes d'ordre ε^2 :

$$t = t' + \varepsilon x', \tag{7}$$

$$x = x' + \varepsilon t'. \tag{8}$$

D'où en substituant ces relations dans (3) :

$$x'_A + \varepsilon t' = V(t' + \varepsilon x'_A) \quad \Longrightarrow \quad x'_A = \frac{V - \varepsilon}{1 - \varepsilon V}\, t'. \tag{9}$$

Le même type de calcul effectué à partir de (4) donne

$$x'_B = \frac{V-\varepsilon}{1-\varepsilon V}\,t' + \frac{L}{1-\varepsilon V}. \tag{10}$$

La différence $x'_B - x'_A$ à un instant t' quelconque calculée à partir de (9) et de (10) montre que L' a pour expression

$$\boxed{L' = \frac{L}{1-\varepsilon V} \approx L(1+\varepsilon V).} \tag{11}$$

On notera que les équations horaires (9) et (10) entraînent que la vitesse V' de la règle par rapport au référentiel $\mathcal{R}'$ est

$$\boxed{V' = \frac{V-\varepsilon}{1-\varepsilon V} \approx V - \varepsilon(1-V^2).} \tag{12}$$

Cette formule peut bien entendu se déduire directement en différentiant les formules (1) et (2).

Remarque. – Le calcul effectué en remplaçant les relations (1)-(2) et (7)-(8) par les transformations de Lorentz *rigoureuses* donne la formule *exacte* suivante :

$$\boxed{L' = \frac{L\sqrt{1-\varepsilon^2}}{1-\varepsilon V}} \tag{13}$$

ainsi que la loi relativiste de composition des vitesses

$$V' = \frac{V-\varepsilon}{1-\varepsilon V}. \tag{14}$$

L'expression (13) permet naturellement de retrouver l'expression habituelle de la contraction des longueurs lorsqu'on suppose $V = 0$.

2

Source : démonstration détaillée par Pierre Teyssandier (chercheur retraité du Centre national de la recherche scientifique [CNRS], Syrte, Observatoire de Paris) à partir de : Provost & Bracco, 2016.

Enseigner la mécanique des fluides au lycée et en début de licence en s'appuyant sur l'histoire des sciences

Propositions didactiques

Clément Crastes

Inscrit dans le champ de recherche de la *NoS* (*Nature of Science*) et associé au thème de la modélisation, ce texte aborde l'enseignement de la mécanique des fluides dans le secondaire et le supérieur, ainsi que l'appui que peut y apporter l'histoire des sciences (HS). Nous effectuons un court état des lieux sur le recours à l'HS dans l'enseignement de la physique, puis nous rappelons des éléments sur l'enseignement de la mécanique des fluides dans un cours traditionnel de physique, dans le secondaire et en premier cycle universitaire. Enfin, nous présentons des propositions didactiques associées à trois visées : épistémologique, liée au développement de la pensée critique et rattachée à l'apprentissage scientifique. Ces propositions se réfèrent à la construction historique de concepts qui sont abordés dans un cours de mécanique des fluides en lien avec l'étude de l'écoulement d'un fluide. Les éléments historiques sont centrés sur la période allant de la fin du XVII^e^ siècle à la première moitié du XIX^e^ siècle.

Mots-clés : modélisation, *Nature of Science* (*NoS*), histoire des sciences, enseignants de premier cycle universitaire, mécanique des fluides

Les programmes de sciences du secondaire et post-bac français ont subi différentes réformes ces dernières années[1]. Parmi les nouveautés thématiques des programmes de l'enseignement de spécialité de physique-chimie

[1] On se réfère ici à la réforme de 2014 pour les classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) et à celle de 2020 pour le lycée général et technologique.

au lycée figure la mécanique des fluides : statique des fluides en classe de première, dynamique des fluides en classe de terminale. Ces thèmes seront ensuite repris et approfondis lors du premier cycle universitaire. Ces programmes de première et de terminale, ainsi que ceux de l'enseignement commun de physique-chimie en seconde et de cette même discipline en filière scientifique des CPGE, valorisent l'activité de modélisation. Il est notamment attendu des enseignants qu'ils contextualisent leur enseignement et introduisent des situations expérimentales « authentiques » permettant de confronter les prévisions théoriques aux résultats expérimentaux. Ces programmes, ainsi que ceux de l'enseignement scientifique du tronc commun de lycée, recommandent par ailleurs aux enseignants d'introduire des éléments d'histoire des sciences (HS) afin de mettre en perspective le thème traité lorsqu'il s'y prête.

Ces éléments curriculaires, liés au recours à l'HS et à la modélisation, résonnent avec des recommandations formulées en sciences de l'éducation dans le champ de recherche centré sur la dimension épistémologique de l'enseignement des sciences. Principalement exploré à l'étranger, ce champ est désigné par l'acronyme *NoS* (*Nature of Science*). Les enjeux associés à la compréhension de la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration sont nombreux, allant notamment d'un meilleur apprentissage des savoirs et savoir-faire scientifiques à la capacité à se forger un avis argumenté et à agir de manière responsable dans des contextes variés (Allchin, 2011 ; Hodson, 2008).

Si des travaux sur l'HS, en particulier dans le domaine de la *NoS* et de la modélisation, concernent le secondaire, rares sont ceux qui portent sur le supérieur. Si les domaines de la physique enseignés au primaire et dans le secondaire ont été très étudiés en didactique des sciences, c'est moins le cas de domaines plutôt réservés à l'enseignement supérieur, tel celui de la mécanique des fluides (Closset, 1992 ; Martin, Mitchell & Newell, 2003), à l'exception de la statique des fluides.

Face à ces différents constats, nous avons entrepris une recherche afin d'examiner comment les enseignants de physique introduisent la mécanique des fluides au niveau de l'enseignement supérieur et quel appui ils pourraient trouver dans l'histoire de ce domaine. Nous nous centrons ici

sur le second point[2]. Nous évoquerons tout d'abord les éléments de mécanique des fluides au programme dans le secondaire et en premier cycle universitaire en France, puis nous ferons quelques remarques sur la place accordée à une réflexion épistémologique et à l'HS dans ces programmes. Nous aborderons également les difficultés des élèves et étudiants en mécanique des fluides, ainsi que celles associées à la dimension épistémologique de l'apprentissage de la physique. Nous poursuivrons par un panorama de la construction historique des principaux concepts abordés dans l'étude de l'écoulement d'un fluide, en nous centrant sur la période allant de la fin du XVII^e^ siècle à la première moitié du XIX^e^ siècle, et structurerons notre présentation autour du thème épistémologique empirie/théorie, connu pour être associé à des difficultés. Nous terminerons par quelques propositions de mobilisation de l'HS en classe correspondant à trois visées d'apprentissage, épistémologique, scientifique et critique.

Éléments sur l'enseignement et l'apprentissage de la mécanique des fluides dans le secondaire et en premier cycle universitaire

Les contenus au programme d'un cours « traditionnel » de physique

Dans les programmes de physique du secondaire français est menée une étude de la statique des fluides et des écoulements dits « parfaits », écoulements pour lesquels les phénomènes de viscosité sont négligeables. En premier cycle universitaire, les thèmes abordés dans le secondaire sont approfondis et on y ajoute l'étude d'un écoulement visqueux.

Détaillons une partie des nouveautés des programmes appliqués à la rentrée 2020 dans le secondaire français. En première générale est abordée la description d'un fluide au repos (notion de forces pressantes, loi fondamentale de la statique des fluides) et, en terminale, la modélisation de l'écoulement d'un fluide (poussée d'Archimède, débit volumique, relation de Bernoulli et effet Venturi). On retrouve ces contenus dans la filière technologique sciences et technologies de l'industrie et du développement durable, dénommée STI2D.

---

2 Pour le premier, voir : Crastes, 2019 ; Crastes & Maurines, 2021.

L'étude de ces notions est prolongée au sein du continuum bac-3/bac+3[3]. Ainsi, en sections de formation de techniciens (brevet de technicien supérieur [BTS] et institut universitaire de technologie [IUT]), on étudie les pertes de charge[4] et le fonctionnement des pompes hydrauliques, *via* notamment l'étude d'abaques et l'expérimentation. En CPGE et en licence scientifique, on peut aller jusqu'à aborder l'équation de Navier-Stokes, qui est associée à l'écoulement visqueux et incompressible d'un fluide. Dans un cursus biomédical, l'accent est mis sur la modélisation de l'écoulement sanguin, avec l'étude des pertes de charge et des échanges sanguins.

L'ordre pédagogique traditionnel de présentation des équations régissant un écoulement incompressible en premier cycle universitaire est celui indiqué ci-dessous. En notant $\vec{v}$ le champ de vitesse et P le champ de pression lors de l'écoulement d'un fluide de masse volumique ϱ et de viscosité dynamique η dans un champ de pesanteur $\vec{g}$, la première équation introduite est l'équation générale de Navier-Stokes :

$$\varrho\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left(\vec{v}.\overrightarrow{grad}\right)(\vec{v})\right] = \varrho\vec{g} - \overrightarrow{grad}(P) + \eta\Delta\vec{v}$$

L'équation de Navier-Stokes se simplifie en l'équation d'Euler, lorsque les phénomènes dissipatifs sont négligeables :

$$\varrho\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left(\vec{v}.\overrightarrow{grad}\right)(\vec{v})\right] = \varrho\vec{g} - \overrightarrow{grad}(P)$$

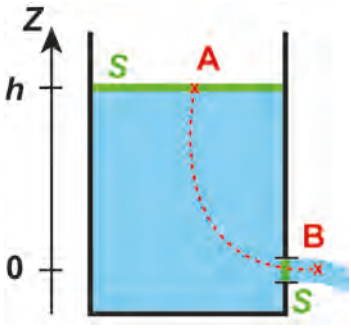
L'équation d'Euler est elle-même simplifiable en la relation de Bernoulli, si on se limite à un écoulement permanent, parfait et que l'on travaille avec deux points A et B d'altitudes z_A et z_B d'une même ligne de courant (voir Document 1) :

$$P_A + \frac{1}{2}\varrho v_A^2 + \varrho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\varrho v_B^2 + \varrho g z_B$$

---

[3] Projet ministériel visant à lisser les modes d'apprentissage de l'élève du début du lycée (bac-3) à la fin du premier cycle universitaire (bac+3).

[4] Les pertes de charge dans une canalisation correspondent à la baisse de pression due à la viscosité de l'écoulement et à la géométrie de la canalisation.



Document 1 – Exemple d'un réservoir percé d'un trou

Source : Barnett, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, *via* Wikimedia Commons <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Torricelli.png>.

Dans le cas de l'écoulement à travers l'orifice (où se situe le point *B*) d'un réservoir de surface libre très grande devant la surface de l'orifice (où se situe le point *A*), on peut simplifier la relation de Bernoulli et obtenir la relation dite de Torricelli :

$$v_B = \sqrt{2gh}$$

Les difficultés des élèves en mécanique des fluides

Concernant les sources de difficulté des élèves en mécanique des fluides, la statique des fluides a été massivement traitée (Kariotoglou, Koumaras & Psillos, 1995 ; Psillos, 1999, 2004 ; Besson, 2001, 2004). C'est moins le cas de domaines propres à l'enseignement supérieur comme la cinématique et la dynamique des fluides. Nous n'avons pas repéré d'autres travaux que ceux de Jean-Louis Closset (1992 ; Blondin, Closset & Lafontaine, 1992) et de chercheurs de l'Université du Wisconsin avec leur *Fluid Mechanics Concept Inventory* (*FMCI*) (Martin, Mitchell & Newell, 2003), repris notamment par Duncan M. Fraser et ses collaborateurs (2007). En statique des fluides, Dimitris Psillos (2004) insiste sur la différenciation entre l'aspect extensif et l'aspect intensif des grandeurs associées : l'aspect non additif de la pression, indépendant de la

quantité de matière, ne semble pas évident pour tous les élèves. Pour certains élèves, c'est la pression qui est transmise à travers les liquides et pour d'autres, c'est la force. Les propriétés vectorielles de la force sont attribuées à la pression.

Concernant la dynamique des fluides, l'équipe de Closset (Blondin, Closset & Lafontaine, 1992) l'aborde dans l'objectif d'améliorer l'enseignement de l'électricité. Notant que Samuel Johsua (1989) rend compte des raisonnements d'élèves en électricité selon la métaphore du fluide en mouvement, ils examinent la possibilité de proposer l'écoulement d'un liquide dans un circuit fermé, c'est-à-dire bouclé sur lui-même, comme analogie possible pour l'étude d'un circuit électrique. L'étude de Closset et de ses collaborateurs est menée *via* des questionnaires crayon-papier auprès d'une centaine d'étudiants de première année universitaire scientifique ayant déjà reçu un enseignement d'hydrodynamique et auprès d'une cinquantaine de novices. Les situations envisagées concernent un circuit hydraulique constitué d'une canalisation fermée qui est reliée à une pompe et qui présente un ou plusieurs rétrécissements, une ou plusieurs ramifications.

Les chercheurs s'intéressent aux tendances de « raisonnement spontané », au sens décrit par Laurence Viennot (1979). Non appris en tant que tel, ce raisonnement se manifeste par des erreurs et peut s'ériger en obstacle lors de l'apprentissage de concepts scientifiques. Les chercheurs signalent que les élèves ont des difficultés à appréhender le problème dans son ensemble : ils ne voient pas l'importance de l'aspect fermé du circuit. Ils repèrent trois idées reçues liées à un raisonnement qualifié de séquentiel : d'une part, la section diminue donc le débit volumique diminuerait, d'autre part, la section diminue et une même quantité d'eau doit traverser une section donnée donc le débit volumique augmenterait (il y a confusion entre le débit volumique et la vitesse moyenne) et, enfin, le rétrécissement n'aurait pas d'influence sur l'amont du circuit. Par ailleurs, ils repèrent que les quatre principaux modes de raisonnement dégagés antérieurement par Closset (1992) pour les circuits électriques se manifestent dans des proportions différentes en hydrodynamique : un raisonnement local (peu présent dans les deux cas), un raisonnement séquentiel qui est minoritaire en mécanique des fluides et majoritaire en électricité, un raisonnement à

débit constant qui est majoritaire en mécanique des fluides et minoritaire en électricité et enfin un raisonnement systémique. Même avec ce dernier mode de raisonnement, plus de la moitié des élèves interrogés pensent que la pression est la même dans tout le circuit hydraulique fermé étudié. Enfin, Closset estime qu'il existe une hiérarchie entre ces modes de raisonnement, hiérarchie qu'il s'agit d'accepter et de faire franchir à l'élève pour espérer, à terme, une assimilation correcte du contenu scientifique. Closset parle de « chemin cognitif » :

> Les modes de raisonnement peuvent être hiérarchisés et constituent alors un passage obligé dans la construction de la connaissance scientifique de nos élèves et de nos étudiants. Les rencontrer et les dépasser en ne tentant pas de bousculer leur hiérarchie naturelle serait la garantie de l'acquisition des compétences cognitives nécessaires à une connaissance scientifique stable d'un sujet déterminé. Nous parlerons à ce propos de « chemin cognitif ». (Closset, 1992 : 155)

Terminons en signalant qu'au cours d'entretiens réalisés auprès d'étudiants français et américains (Crastes, 2019), est ressortie l'idée que lors d'un rétrécissement de canalisation, la pression serait plus forte là où la section serait la plus étroite, les particules de fluide y ayant moins de place. Précisons également que certaines difficultés susceptibles d'être rencontrées par les élèves et étudiants nous semblent devoir varier d'une filière à une autre (technicité mathématique, capacité d'abstraction, recours à l'informatique pour rechercher une solution approchée, etc.), tandis que d'autres paraissent communes à l'ensemble des filières (choix du modèle, détermination des termes négligeables dans l'équation régissant le phénomène, confrontation des prévisions théoriques aux résultats expérimentaux).

Les éléments épistémologiques et historiques dans l'enseignement et l'apprentissage de la physique, en particulier de la mécanique des fluides

Après les concepts scientifiques, lois et modèles au programme d'enseignement, abordons à présent les savoirs épistémologiques et historiques mentionnés dans les programmes.

Si les préambules des programmes mettent en avant la modélisation et l'HS, les objectifs qui leur sont assignés restent généraux, implicites

et non opérationnalisés dans les tableaux de contenus. Par exemple, en CPGE, il est question uniquement dans le programme « d'acquérir des éléments de culture », de mettre le thème étudié « en perspective avec l'HS et des techniques » dans le cadre d'une « mise en contexte des contenus scientifiques ».

Dans les manuels scolaires, l'HS est souvent peu abordée en mécanique des fluides. Cela est particulièrement vrai en France. Et ce, contrairement à d'autres domaines comme la mécanique quantique ou l'optique, où cette approche est davantage mise en avant. Cela surprend d'autant plus qu'il existe une littérature en histoire de la mécanique des fluides qui est riche et qui fait l'objet de recherches actuelles (par exemple Olivier Darrigol et Alexandre Guilbaud en France).

Le même constat peut être fait à propos des revues dédiées aux enseignants et aux chercheurs, comme *Le Bup. Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie* en France ou l'*American Journal of Physics* aux États-Unis. Très peu d'articles ont été publiés en lien avec l'histoire de la mécanique des fluides sur la période allant du XVIII^e^ au XIX^e^ siècle. À ce jour, à notre connaissance, aucun article dans *Le Bup* et un seul dans l'*American Journal of Physics*, datant de 1953 (Seeger, 1953).

Si l'HS n'est pas explicitée, elle inspire néanmoins certains dispositifs et expériences proposés dans les manuels et ressources pour enseignants et élèves/étudiants, comme celui qui sera discuté dans la dernière section de notre texte.

Par ailleurs, les études dans le champ de la *NoS* montrent que les enseignants partagent des conceptions de la science/des sciences voisines de celles des élèves et étudiants. Semblables à une mosaïque, elles relèvent d'une vision réaliste naïve et empirico-inductive de la science (Lederman, 2007 ; Roletto, 1998). De plus, selon cette vision, la théorie serait pour beaucoup découplée des résultats expérimentaux et les modèles décriraient la réalité (Tiberghien, 1994 ; Van Driel & Verloop, 2002 ; Soler, 2013). Par ailleurs, les connaissances en HS des enseignants du secondaire et du supérieur sont limitées (Martinand, 1993 ; Crastes, 2019[5]).

[5] À quelques rares exceptions dans l'échantillon étudié, les connaissances en histoire des sciences des enseignants interrogés dans le cadre de notre thèse sont lacunaires et se limitent à la citation de quelques noms, couplés à des portraits et des dates.

Ces différents constats interrogent sur les objectifs que les enseignants sont susceptibles de se fixer. En effet, recourir à l'HS lors d'un enseignement de physique nécessite au préalable de la part de l'enseignant de réfléchir à ce qu'il cherche à travailler avec les étudiants et à ce qu'il prend en charge dans son cours de physique.

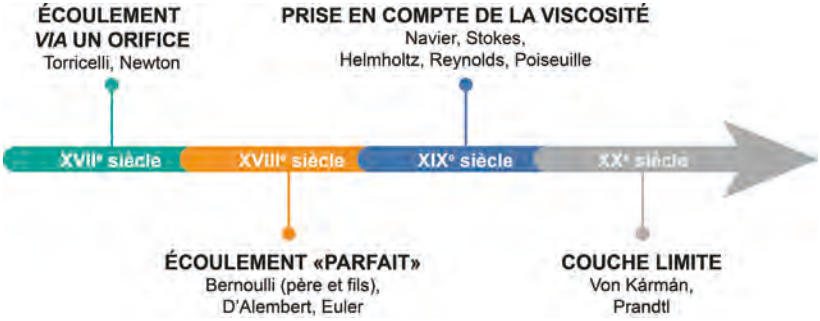
N'utiliser l'HS que pour aider à l'apprentissage de concepts scientifiques au programme risque d'aboutir à son appauvrissement. En revanche, comme le soulignent Jean-Louis Martinand (1993) et d'autres didacticiens de la physique (Hosson, 2004 ; Maurines & Beaufils, 2011), y recourir peut être l'occasion d'étudier les conceptions de scientifiques d'autrefois et leur évolution au sein d'une communauté de recherche, d'y déceler des pistes permettant d'émettre des hypothèses sur les difficultés des élèves, d'élaborer des dispositifs d'enseignement adaptés, en ravivant le questionnement scientifique, à la fois pour l'enseignant et l'élève.

Introduire l'HS dans l'enseignement peut être aussi l'occasion de développer la réflexion des élèves sur la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration, et plus largement sur la *NoS*. Ainsi, Laurence Maurines et Daniel Beaufils (2013) proposent de définir des objectifs précis d'apprentissage épistémologique liés au recours à l'HS, comme faire comprendre, entre autres, l'évolution des connaissances au cours du temps, par continuité et rupture, la relation forte entre questions techniques et évolution des idées, l'interdépendance entre sciences et société, le fait que les savants d'une époque donnée ont rencontré des difficultés conceptuelles, les interactions entre sciences et croyances, le fait que l'activité scientifique est source de controverses. Dans la lignée des investigations documentaires à caractère historique fondées sur des dossiers de textes spécifiquement conçus pour chaque objectif et contexte historico-scientifique proposés par ces chercheurs, a été élaboré et expérimenté en classe un dispositif d'enseignement centré sur l'histoire de la loi de la réfraction (Slaïma & Maurines, 2017). Celui-ci vise notamment à travailler les interactions entre théorie et empirie et à s'interroger sur la démarche suivie (la construction de la pensée scientifique débute-t-elle ou non systématiquement par de la théorie ?, la démarche suivie est-elle systématiquement hypothético-déductive ?, etc.).

Histoire de la mécanique des fluides

Le travail mené ici s'inscrit dans un cadre de didactique et non d'HS. Nous n'avons pas la prétention d'avoir suivi une méthodologie d'historien. Il n'y a pas eu de travail sur les textes originaux, même si une partie d'entre eux a été consultée. Nous débutons par une description historique (Crastes, 2019) qui découle de travaux préalables, riches et fournis, d'historiens des sciences (Hahn, 1965 ; Nordon, 1992 ; Darrigol, 2005 ; Guilbaud, 2007). Puis nous ouvrons dans la section suivante quelques pistes pédagogiques d'utilisation de cette description.

La frise du document 2 retrace les principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides qui ont eu lieu entre le XVII^e^ siècle et la première moitié du XX^e^ siècle.



Document 2 – Principales étapes de l'histoire de la mécanique des fluides du XVII^e^ siècle à la première moitié du XX^e^ siècle

Source : Réalisation de l'auteur.

Nous nous centrons sur la période allant de la fin du XVII^e^ siècle à la première moitié du XIX^e^ siècle, dont les avancées correspondent à l'essentiel du contenu enseigné en premier cycle universitaire.

Nous proposons une périodisation en trois stades, reconstruite *a posteriori* à partir de la discipline telle qu'elle est actuellement enseignée, chacun de ces stades correspondant à des questionnements spécifiques :

1. une **problématique expérimentale** et une **tentative d'interprétation** au XVII^e^ siècle, qui correspondent aux prémisses,
2. un **développement théorique qui présente des limites** et aboutit à des difficultés au siècle des Lumières,
3. et enfin un **nouveau modèle qui permet de dépasser ces difficultés** dans la première moitié du XIX^e^ siècle.

Stade 1

Au XVII^e^ siècle, en lien avec le développement des fontaines dans les cités italiennes, Evangelista Torricelli (1608-1647) étudie le mouvement de l'eau à la sortie d'un vase percé d'un trou étroit. Il choisit un vase large de niveau d'eau maintenu constant, permettant d'assurer un écoulement quasi-permanent, et indique :

> Je suppose que les eaux, qui sortent avec violence, ont au point de leur sortie la mesme impétuosité, ou le mesme degré de vistesse, qu'auroit acquis un corps pesant ou une goutte de la mesme eau, si elle estoit tombée naturellement, de la plus haute surface de la mesme eau, jusques à l'ouverture par où elle sort. (Torricelli, *De Motu Aquarum* [1644], traduction de 1664, citée par Nordon, 1992 : 14)[6]

En ce qui concerne les conditions expérimentales dans lesquelles il se place pour obtenir un tel résultat, il précise choisir un récipient « d'une capacité convenable » et « percé d'un petit trou » (Torricelli, cité par Nordon, 1992 : 14).

L'enjeu est alors d'expliquer pourquoi l'eau, en sortie du trou, a une vitesse égale à celle qu'elle aurait eue si elle était tombée en chute libre depuis la surface libre du réservoir. Torricelli réalise une expérience où le jet d'eau, en sortie du réservoir, est pointé vers le haut. Le jet d'eau devrait alors parvenir à monter jusqu'au niveau de la surface libre du réservoir, ce qu'il ne constate pas expérimentalement. Il reprend alors l'expérience avec du mercure et les résultats lui paraissent un peu plus

---

[6] La formulation moderne de ce texte, nommée loi de Torricelli, se résume en $v = \sqrt{2gh}$ avec v la vitesse du fluide considéré au niveau de l'orifice, g le champ de pesanteur au sol et h la hauteur entre l'orifice et la surface libre du fluide dans le récipient.

en accord avec ses prévisions. Il en conclut que : « L'expérience mesme semble en quelque façon prouver ce principe, bien qu'aussi elle semble en quelque façon le détruire » (Torricelli, cité par Nordon : 122). Christian Huygens (1629-1695) reprend les travaux expérimentaux de Torricelli, mais ils ne sont toujours pas concluants. Huygens indique alors que la loi de Torricelli n'a pu être « desmontrée par raison, mais seulement prouvée par expérience » (Huygens, cité par Nordon, 1992 : 123).

Marcel Nordon considère que Torricelli « ouvre une porte de cinématique sans savoir que la dynamique est derrière » (Nordon, 1992 : 54) et pointe l'état de la réflexion à cette époque : « Les difficultés sont considérables car une telle démarche impose le développement d'une science du mouvement dépassant largement l'étude du point matériel ou même des systèmes de corps » (Nordon, 1992 : 54). C'est au siècle suivant qu'une preuve théorique de ce résultat est obtenue.

Stade 2

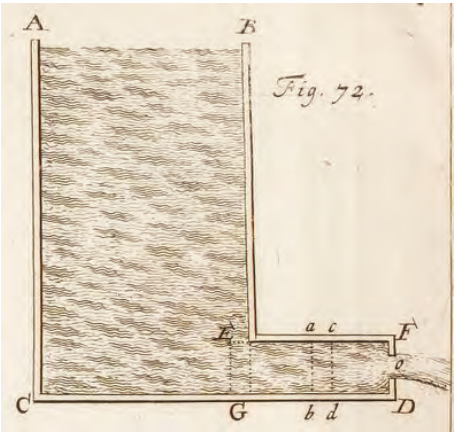
Dans *Hydrodynamica* (1738), Daniel Bernoulli introduit deux idées nouvelles : le principe de conservation des forces vives (*vis viva* : « La descente réelle est égale à la montée potentielle » [Bernoulli, cité par Nordon, 1992][7]) et le découpage du fluide en tranches transversales pour étudier l'écoulement. La pression est présentée comme un effort exercé sur les parois (le rôle de la pression à l'intérieur du fluide n'est pas encore perçu) et est reliée à la vitesse aux frontières du volume global de fluide en régime permanent.

Le principe des forces vives et le découpage du fluide en tranches permettent à Daniel Bernoulli de prouver théoriquement la loi de Torricelli.

---

[7] Daniel Bernoulli énonce en ces termes le principe des forces vives dans *Hydrodynamica* : « Nous considérerons la montée potentielle d'un Système, dont les différentes parties se meuvent avec des vitesses quelconques, comme représentée par la hauteur susceptible d'être atteinte par le centre de gravité du système dans le cas où les différentes parties, prenant avec leur vitesse acquise une direction ascensionnelle, atteignent chacune leur altitude maximale ; et la descente réelle comme représentée par la différence d'altitude parcourue par le centre de gravité du système après que ses différentes parties aient retrouvé le repos » (Bernoulli, cité par Nordon, 1992).

Il reprend la situation étudiée par Torricelli. Sur la gravure du document 3 figure un récipient *ABGC* rempli, de surface libre *AB*.



Document 3 – Gravure, extraite de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica, sive de Viribus et motibus fluidorum commentarii, opus academicum...*, Argentorati, sumptibus J. R. Dulseckeri, 1738, Tab. XI, Fig. 72.

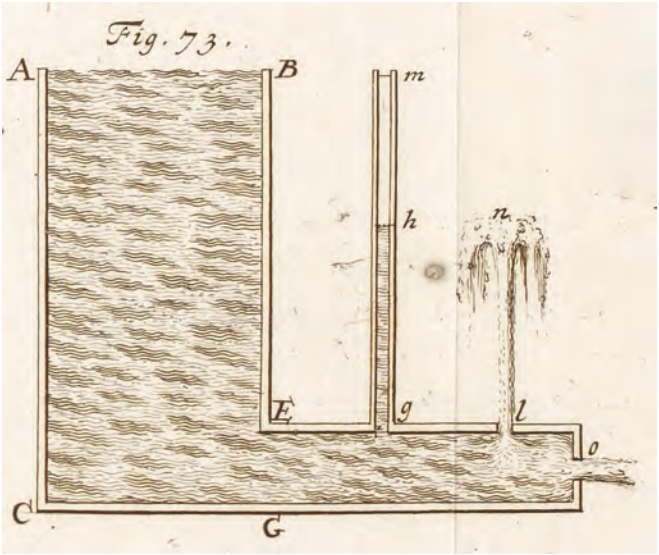
Source : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

Via un rétrécissement *EG* lui est associée une canalisation horizontale *EFDG* présentant un orifice *o*. Daniel Bernoulli introduit la démarche novatrice de découper le fluide en tranches perpendiculaires à la direction du mouvement et de suivre leur mouvement (voir sur la gravure du document 3 la portion notée *abdc*). La notion de pression n'est associée qu'aux parois : il n'y a pas la notion de champ de pression comme on peut la trouver dans les travaux ultérieurs de son père et de Leonhard Euler. Par ailleurs, Daniel Bernoulli se limite à l'étude d'écoulements stationnaires. Il réussit à retrouver théoriquement la loi de Torricelli et il en précise les conditions de validité. Il évalue la pression p s'exerçant sur les parois *FD* du tube et obtient :

$$p = a\frac{n^2 - 1}{n^2}$$

Avec n le rapport entre la section du tube et la surface de l'orifice et a la charge d'eau au-dessus de l'orifice o. Il s'agit d'une variante de ce que l'on

nomme désormais la « relation de Bernoulli »[8]. On constate la différence de formulation entre la version historique et celle actuellement enseignée. Bernoulli aborde également le cas d'une canalisation horizontale avec deux orifices supplémentaires placés en *g* et *l* (voir Document 4).



Document 4 – Gravure, extraite de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica, sive de Viribus et motibus fluidorum commentarii, opus academicum…*, Argentorati, sumptibus J. R. Dulseckeri, 1738, Tab. XI, Fig. 73.

Source : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

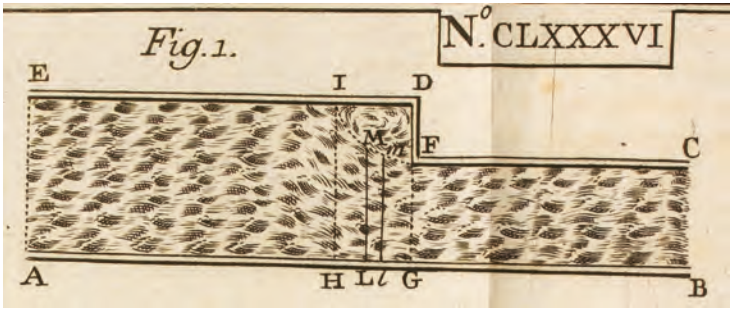
En *g* est inséré un tube ; en *l*, rien. On observe que dans le tube placé en *g*, le niveau d'eau se stabilise au point *h* et non au point *m* qui, lui, est situé à

---

[8] Dans l'expression historique $p = a\frac{n^2-1}{n^2}$, la « pression » p correspondrait à la grandeur actuelle $\frac{P-P_{atm}}{\varrho g}$, avec P la pression dans le tube, P_{atm} la pression atmosphérique et la « charge » a correspondrait à la grandeur actuelle h, différence d'altitude entre la surface libre et l'orifice o.
L'expression historique s'écrirait alors $\frac{P-P_{atm}}{\varrho g} = h\left(\frac{n^2-1}{n^2}\right) = h\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$, avec $v_o^2 \sim 2gh \leftrightarrow h = \frac{v_o^2}{2g}$ et $n = \frac{S_{tube}}{S_o} = \frac{v_o}{v}$, v étant la vitesse moyenne de l'eau dans le tube et v_o celle au niveau de l'orifice o, soit $\frac{P-P_{atm}}{\varrho g} = \frac{v_o^2}{2g}\left(1-\frac{1}{\left(\frac{v_o}{v}\right)^2}\right) = \frac{v_o^2}{2g} - \frac{v^2}{2g} \leftrightarrow P + \frac{1}{2}\varrho v^2 = P_{atm} + \frac{1}{2}\varrho v_o^2$, ce qui correspondrait à la formulation actuelle de la relation de Bernoulli.

la même hauteur que la surface libre du réservoir *ABGC*. Le niveau d'eau a baissé lors de l'écoulement dans la canalisation horizontale. En *l*, le niveau atteint par le jet d'eau est sensiblement le même qu'en *g*.

Dans *Hydraulica* (1742), Jean Bernoulli aborde la même thématique que son fils Daniel. Il décompose le fluide en un ensemble de veines (voir Document 5) et retrouve des résultats similaires à ceux de son fils. La valeur ajoutée de son travail est qu'il introduit la notion de pression à l'intérieur du fluide et non plus uniquement sur les parois, et qu'il aborde le cas d'un écoulement non permanent.



Document 5 – Gravure, extraite de Jean Bernoulli, « Hydraulica », *Opera omnia, tam antea sparsim edita quam hactenus* inedita, cura G. Cramer…, tome IV, 1742, Tab. LXXXIX, N° CLXXXVI, Fig 1.

Source : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

D'Alembert, dans le *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744) et dans l'*Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides* (1752), remet en cause la légitimité du principe de conservation des forces vives. Ses principales contributions sont l'analyse du travail de ses prédécesseurs et des questions qu'il soulève. Il note ainsi que, sans l'hypothèse du parallélisme des couches de fluide, « il n'y aurait plus alors d'autre moyen pour déterminer ce mouvement que d'examiner celui que chaque particule devrait avoir » (D'Alembert, cité par Hahn, 1965). D'Alembert perçoit la statique des fluides comme un cas particulier de dynamique des fluides. Son travail constitue une étape dans la généralisation et l'unification de la mécanique, les solides et les fluides étant vus

comme des supports différents de mêmes lois. Par ailleurs, il apporte une contribution à l'étude des marées et des alizés : il introduit l'outil des équations aux dérivées partielles, qui sera ensuite repris par Pierre-Simon de Laplace, et signale un terme lié au mouvement de rotation de la Terre (dénommé plus tard « force de Coriolis »). Ce type d'étude est lié aux problèmes économiques de l'époque, en l'occurrence ici le transport maritime.

C'est Euler qui structure les équations du mouvement d'un fluide. Il transpose à l'étude d'un écoulement les avancées que lui et d'Alembert ont obtenues au préalable en mécanique des solides déformables, en particulier le recours aux dérivées partielles. Il analyse le fluide comme étant un milieu continu pour lequel on étudie le champ de vitesse et le décompose en couches parallèles reprenant la démarche de d'Alembert. Il introduit le concept de pression interne au fluide et évalue la variation d'un volume élémentaire de fluide en écoulement pendant une durée élémentaire. Il couple cette démarche à la conservation de la masse, puis exprime l'accélération de ce volume et obtient les équations du mouvement. Il aboutit ainsi aux équations[9] « pour un fluide idéal et compressible, dans son mémoire de 1755 intitulé "Principes généraux du mouvement des fluides" et publié dans les Mémoires de l'Académie de Berlin » (Guilbaud, 2007 : 182).

Dans ses écrits, Euler mentionne les difficultés qu'il a rencontrées : « j'espère d'en venir heureusement à bout, de sorte que s'il reste des difficultés, ce ne sera pas du côté du méchanique, mais uniquement du côté de l'analytique » (Euler, cité par Dugas ([1950] 1996 : 288).

Il pointe également l'objectif général qu'il a poursuivi et les liens qui peuvent être établis avec les recherches de ses confrères :

> La généralité que j'embrasse, au lieu d'éblouir nos lumières, nous découvrira plutôt les véritables lois de la nature dans tout leur

---

[9] La formulation historique est $P - \frac{1}{q}\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ avec $P - \frac{1}{q}\frac{\partial p}{\partial x}$, la composante selon x de la « force accélératrice » appliquée à l'élément de volume de fluide considéré, q la « densité du fluide » au point considéré, u, v, w les composantes de la vitesse. L'équation d'Euler, réécrite à trois dimensions à l'aide d'opérateurs se noterait de nos jours $\varrho\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\overrightarrow{grad})(\vec{v})\right] = \varrho\vec{g} - \overrightarrow{grad}(P)$, avec ϱ la masse volumique du fluide considéré, $\vec{v}$ le champ de vitesse, $\vec{g}$ le champ de pesanteur et P le champ de pression.

> éclat et on y trouvera des raisons encore plus fortes d'en admirer la beauté et la simplicité. (Euler, cité par Dugas, [1950] 1996 : 287)
>
> Quelques sublimes que soient les recherches sur les fluides dont nous sommes redevables à MM. Bernoulli, Clairaut et d'Alembert, elles découlent si naturellement de nos deux formules générales qu'on ne saurait assez admirer cet accord de leurs profondes méditations avec la simplicité des principes dont j'ai tiré mes deux équations et auxquelles j'ai été conduit immédiatement par les premiers axiomes de la mécanique. (Euler, cité par Dugas, [1950] 1996 : 292)

Darrigol voit dans le travail d'Euler l'illustration du cas où la découverte des équations régissant le phénomène est finalement plus simple que leur validation expérimentale :

> *general principles and assumptions may lead us to the foundations of a theory and yet leave us in nearly complete ignorance of the phenomena in its field. In such cases, much creative work is needed to truly understand the empirical content of the theory.* (Darrigol, 2005 : 215)

Dugas rappelle néanmoins qu'Euler :

> ne devait pas, précisément en raison des difficultés analytiques du problème général, méconnaître la portée et l'intérêt des considérations mi-théoriques, mi-expérimentales utilisées en hydraulique, d'autant plus qu'il s'était intéressé personnellement à la roue Segner, avait analysé le fonctionnement des turbines, et réalisé lui-même une turbine à réaction, en précurseur des techniques modernes. (Dugas, ([1950] 1996 : 292)

Ainsi, assez tôt dans le développement de ce domaine, des équations régissant les phénomènes sont obtenues.

Cependant, leur non-linéarité implique l'absence d'une solution générale connue. La recherche d'une solution va être une des préoccupations majeures des savants du siècle des Lumières. Cette absence de solution mathématique connue, couplée à l'hypothèse du parallélisme des tranches, aboutit à une vision de l'écoulement trop éloignée des résultats expérimentaux de l'époque. Évoquant les travaux de Charles-Augustin Coulomb sur les frottements qui sont à visée purement pratique, Dugas signale que la mécanique des frottements « demeure à l'époque liée à l'art vulgaire des machines, tandis que la mécanique

rationnelle se développait sur le plan mathématique sans égard au frottement » (Dugas, [1950] 1996 :308).

Stade 3

De par la démarche de Charles Bossut et de Jean-Charles de Borda, le rapprochement entre les deux approches, théorique et expérimentale, s'enclenche à la fin du XVIII^e^ siècle. Par exemple, à cette période, en France, les ouvrages dédiés aux écoulements abordent à nouveau ces deux approches. Le changement s'opère définitivement à la génération suivante, grâce notamment à la création de l'École polytechnique en France qui propose un nouveau type d'enseignement contenant, entre autres, de l'hydrodynamique et que suivent Henri Navier, Gaspard-Gustave Coriolis, Adhémar Barré de Saint-Venant. Plus tard, ils y enseigneront, ainsi qu'à l'École des ponts et chaussées, tout en étant membres de l'Académie des sciences. Hydrodynamique et hydraulique sont associées. C'est donc au début du XIX^e^ siècle que le fossé entre approche pratique et théorique peut commencer à s'estomper. À l'occasion des interférences entre ces deux approches, chacune d'entre elles évolue sans pour autant fusionner l'une avec l'autre.

Nous résumons ces éléments dans le document 6.

	Contextes et visées/ problèmes	**Questions explorées et démarche**	**Avancées théoriques techniques**	**Problèmes non résolus**
Torricelli (XVII^e^ siècle)	Jets d'eau Rendre compte de la hauteur atteinte par le jet d'eau	Mouvement de l'eau à la sortie d'un vase percé d'un trou étroit Étude empirique	Première tentative de justification de la loi énoncée	Non prise en compte de la viscosité
Bernoulli père et fils D'Alembert Euler (XVIII^e^ siècle)	Étude des alizés (d'Alembert) Concilier prévisions théoriques et résultats expérimentaux	Prouver la relation de Torricelli Étude théorique	Justification obtenue de la loi de Torricelli	Non prise en compte de la viscosité et des conditions aux limites Cas du fluide stagnant (théorie du sillage)

	Contextes et visées/ problèmes	Questions explorées et démarche	Avancées théoriques techniques	Problèmes non résolus
Navier Stokes Poiseuille (XIX[e] siècle)	Écoulement sanguin (Hagen, Poiseuille) Concilier prévisions théoriques et résultats expérimentaux	Justifier l'écart entre les prévisions du modèle d'Euler et les résultats expérimentaux Études empirique et théorique	Modélisation des forces de viscosité Modélisation du lien entre débit volumique et différence de pression dans une canalisation cylindrique Précision remarquable des mesures effectuées par Poiseuille	Résolution de l'équation de Navier-Stokes La justification théorique de la relation de Hagen-Poiseuille n'est établie que vingt ans plus tard par Hagenbach Concept de vorticité

Document 6 – Tableau récapitulatif des principales étapes historiques de construction du modèle aujourd'hui enseigné

Source : Réalisation de l'auteur.

Il y a donc eu deux phases, l'une liée à l'évolution des idées, de Bernoulli à Euler, puis une « étape de retour vers le concret », citation de Roger Hahn rappelée par Guilbaud (2007 : 27). Pour Hahn, si cela n'a pas eu lieu plus tôt, ce n'est pas uniquement pour des raisons sociologiques. Il examine donc de l'intérieur la science de l'hydrodynamique (Hahn, 1965) et se demande si, à cette époque, les instruments expérimentaux à disposition sont assez développés, si le recours à un raisonnement de type milieu continu freine les possibilités et si les théoriciens ne sont pas trop préoccupés par les problèmes d'axiomatisation, au détriment des conditions aux limites des équations trouvées. Précisons quelques aspects de ce rapprochement, *via* l'obtention de l'équation dite de Navier-Stokes, qui illustre la nécessité de la mise en place au XIX[e] siècle de nouvelles stratégies pour associer expérience et théorie. Darrigol (2005) constate qu'il n'y a eu aucun progrès en mécanique des fluides dû à une seule approche mathématique. Il justifie ce constat par le fait que les équations régissant la mécanique des fluides sont des équations différentielles non linéaires : il y a donc très peu de cas où on sait les résoudre. Toutes les avancées

du XIX^e^ siècle sont dues à des « physiciens-ingénieurs », familiers de problèmes pratiques. La démarche suivie en mécanique des fluides n'est pas une démarche inductive. Elle consiste en l'étude de problèmes pratiques, couplée à un apport de physique théorique. Darrigol estime que se sont mis en place des « schémas conceptuels » liant fondements théoriques et problèmes concrets. Ces schémas nécessiteraient beaucoup de créativité et amélioreraient profondément la compréhension des phénomènes. Pour Darrigol, ces « schémas conceptuels » illustrent la structure modulaire de la physique, où chaque module peut être lui-même une théorie. Ces modules sont de différentes natures, ils sont réducteurs et servent tantôt à définir une notion, tantôt à approximer, à idéaliser ou à illustrer. Grâce à la construction d'une structure modulaire adéquate, l'opposition entre théorie et expérience est dépassée.

Propositions didactiques

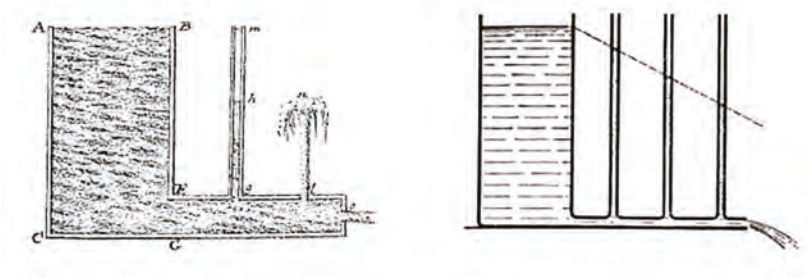
Comme mentionné à la fin de la section II de notre texte, l'HS est susceptible de contribuer au développement des connaissances physiques, épistémologiques et didactiques des enseignants, et de revivifier leur questionnement. Introduite en classe, elle peut être associée à différentes visées, non exclusives, d'apprentissage : épistémologique (Adúriz-Bravo, 2011 ; Maurines & Beaufils, 2011), scientifique (Hosson *et al.*, 2018) et de développement de la pensée critique (Allchin, 2011). Nous nous appuyons sur l'étude précédente pour ouvrir quelques pistes didactiques.

Vivifier le questionnement scientifique

La connaissance des problèmes explorés par le passé est susceptible d'aider à enrichir les contextes et questionnements introduits dans la classe. Une telle connaissance est également susceptible de faciliter un regard plus critique sur les ressources proposées aux élèves et étudiants. Nous commençons par aborder ce point, avant de montrer comment cette connaissance peut aider à travailler sur les limites des modèles étudiés et leur mise en évidence expérimentale.

Regard critique sur les ressources pédagogiques

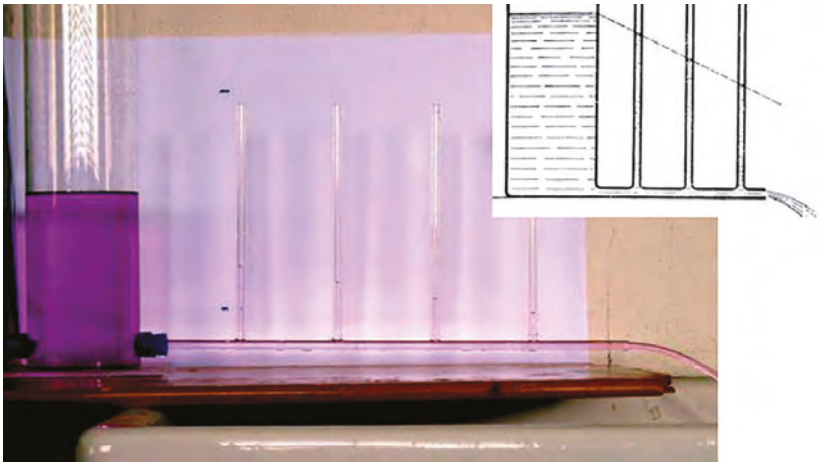
Nous illustrons ce point en prenant l'exemple des schémas du document 7 qui traitent du cas d'un réservoir avec une canalisation ouverte sur un orifice et percés par des tubes verticaux de mesure de la pression, dit tubes de Pitot. Cette situation, traditionnellement employée dans un cours de mécanique des fluides (Crastes, 2019), renvoie à une situation historique proposée dans l'ouvrage *Hydrodynamica* de Daniel Bernoulli et schématisée comme sur la partie gauche du document 7 (qui est une reprise du document 4). On retrouve cette situation dans un polycopié de centre de préparation universitaire au concours de recrutement d'enseignants du secondaire de physique-chimie dans une forme schématisée comme sur la partie droite du document 7. Il pourrait être intéressant, pour l'enseignant, de connaître la version originelle du schéma d'une telle situation. En effet, le rapprochement avec le schéma actuel du polycopié sur lequel est tracée une droite passant par les surfaces libres des tubes de Pitot pourrait l'amener à s'interroger sur cette droite, plus précisément sur sa pente, qui ne correspond pas à celle de la droite que l'on peut tracer par la pensée à partir du schéma de gauche. Avant de développer les aspects théoriques associés à cet écart, intéressons-nous aux aspects empiriques.



Document 7 – : Deux schémas visualisant l'écoulement d'un fluide dans une canalisation

Source : schéma de gauche : extrait d'*Hydrodynamica* (voir document 4 pour la référence exacte) ; schéma de droite : extrait d'un polycopié d'un centre de préparation au certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement du second degré (CAPES).

Un moyen de savoir si la droite tracée est correcte est de réaliser l'expérience à condition d'avoir comme objectif de confronter théorie et empirie. Nous allons montrer à présent que ce qui était un des aspects marquants de l'histoire de la construction du modèle actuellement employé pour étudier un écoulement incompressible n'est pas mis en œuvre dans le polycopié du centre de préparation au CAPES évoqué à l'instant. Une photographie de l'expérience qu'il est proposé aux étudiants de réaliser est fournie (partie gauche du document 8). La formule de pertes de charge régulière dans une canalisation est ensuite rappelée. En effet, cette manipulation de cours est censée illustrer cette notion de pertes de charge, représentée sur le schéma de droite du document 7 par la droite qui relie les surfaces libres de liquide dans les différents tubes de prise de mesure de pression.



Document 8 – Une photographie et un schéma en haut à droite liés à l'écoulement d'un fluide

Source : extraits d'un polycopié d'un centre de préparation au CAPES.

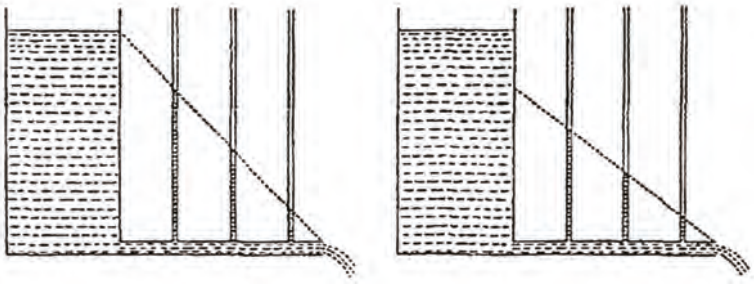
Note : Le niveau de fluide dans les tuyaux verticaux apparaît via *l'ombre projetée sur l'écran blanc derrière les tuyaux*

En reliant par la pensée ces points sur la photographie du document 8, on constate qu'ils ne partent pas de la surface libre du réservoir, à gauche. On constate également qu'ils n'aboutissent pas non plus à l'orifice de

sortie du tube, sur la droite. Cela peut s'expliquer par exemple par les pertes de charge singulière à l'entrée et à la sortie du tuyau horizontal. Il est étonnant d'observer un décalage entre ce qui est observable sur la photographie et ce qui est représenté sur le schéma explicatif associé.

Les documents historiques comme source de réflexion pédagogique sur les modèles

Une variante du document 7 (voir Document 9) peut être proposée aux étudiants ou à des enseignants lors d'une séquence de formation continue pour les faire travailler sur la notion de modèle et ses limites, et les inciter à recourir à l'expérimental pour confronter prévisions/schématisations et empirie. Nous la décrivons puis résumons les questions qui se posent et pourraient être posées.



Document 9 – Pertes de charge

Source : Farwell, 1944.

Sur les deux schémas du document 9 est évoquée une perte de charge linéaire dans une canalisation horizontale à section constante, qui se traduit par une baisse du niveau d'eau dans les trois tubes de prise de mesure de pression, régulièrement répartis dans la canalisation horizontale.

La seule différence entre les deux schémas est liée à l'ordonnée du point d'intersection du réservoir et de la droite représentée : cette droite atteint-elle ou non la surface libre du réservoir ? En pratique, qu'obtient-on ? Si on se réfère par exemple à la photographie du document 8, la courbe, qui relie les surfaces libres des tubes de prise de mesure de pression dans la

canalisation horizontale, est quasi-droite dans une portion de la canalisation. De plus, elle n'atteint pas en amont la surface libre du réservoir. Le schéma de gauche du document 9 paraît donc moins adapté que celui de droite pour schématiser la situation.

La perte de charge attendue dans le tuyau horizontal n'est linéaire que dans la zone d'écoulement dite *fully-developed* : cela découle de la propriété du champ de vitesse d'être du type $\vec{v} = v(y)\vec{u_x}$ dans cette zone de l'écoulement. Cette zone ne démarrant pas à l'entrée du tuyau, il n'y a pas de raison *a priori* que la courbe représentant la hauteur d'eau dans les tubes de prise de mesure de pression atteigne la surface libre du réservoir. Une autre manière de le justifier est de considérer le rétrécissement brutal lors du passage du réservoir au tube horizontal : à ce rétrécissement brutal peut être associée une perte de charge dite singulière. Il n'y a donc pas *a priori* continuité de la pression à cet endroit-là, entre la valeur de la pression dans le réservoir, juste avant le rétrécissement et la valeur de la pression au sein de la canalisation horizontale dans la zone d'écoulement dite *fully-developed*. La zone du rétrécissement brutal du réservoir au tube horizontal ne correspond pas à une zone d'écoulement *fully-developed*. La décroissance de la pression n'y est donc pas *a priori* linéaire. On attend donc une courbe de décroissance de la pression non linéaire *a priori*, suivie d'une droite décroissante mais ce, uniquement dans la zone d'écoulement dite *fully-developed*.

Le schéma de droite apparaît donc plus plausible que celui de gauche. Pour autant, sa validité nécessiterait de réfléchir aux conditions opératoires retenues : viscosité du fluide, tailles caractéristiques du problème pour évaluer si on est ou non dans la zone d'écoulement « *fully-developed* » par exemple, si on est en régime permanent, etc.

On note également sur la photographie du document 8 que l'extrémité aval de la droite n'atteint pas le point de sortie du tuyau, contrairement à ce qui est représenté sur les deux schémas du document 9. Les deux représentations restent donc des simplifications d'une situation réelle donnée.

Cette situation, inspirée d'une situation historique, apparaît par conséquent comme un outil utile pouvant être proposée aux étudiants ou aux enseignants en formation continue pour les aider à repérer les

problèmes associés à une telle situation, ainsi qu'à réfléchir à leur mode de raisonnement et à leur pratique expérimentale. Le lecteur intéressé par les éléments de réponses donnés par des enseignants du supérieur à qui nous l'avons présentée en entretien peut se rapporter à : Crastes, 2019[10].

Développer la réflexion épistémologique

Nous nous plaçons ici dans la continuité de Maurines et Beaufils (2011). La visée épistémologique pourrait consister notamment à donner à voir comment les modèles ont été élaborés au cours du temps (interaction empirie et théorie), les difficultés rencontrées, les avancées liées aux interactions entre communautés.

Construction historique du modèle actuellement enseigné

Comme nous l'avons constaté dans la section III, on observe ainsi sur la période allant de la fin du XVII^e^ siècle à la première moitié du XIX^e^ siècle le processus de construction du modèle actuellement retenu pour étudier un écoulement incompressible : à partir d'un questionnement expérimental sur un écoulement à travers un orifice, une structuration des équations aux dérivées partielles régissant ce phénomène est établie qui,

[10] Cela n'a pas été pas sans soulever des difficultés et des résistances parmi eux. La situation du document 9 est pourtant représentée dans de nombreux ouvrages, tant à destination d'étudiants physiciens que biologistes ou médecins, mais très souvent sans le prolongement de la droite en amont et en aval. L'aspect abordé dans ces deux schémas (où la droite coupe-t-elle le réservoir ?) sort du cadre habituel de la fonction de ce schéma, qui est d'habitude d'évoquer la linéarité de la perte de charge dans une partie d'une canalisation horizontale. Ce léger décalage aurait pu fournir l'occasion aux enseignants interrogés de réfléchir aux conditions de validité de la linéarité de la perte de charge par exemple : cela n'a pas été le cas. Par ailleurs, la majorité des enseignants ayant rencontré des difficultés pour répondre à la question indiquent ne pas avoir eu recours à des expériences de cours en mécanique des fluides. Signalons que les enseignants n'ayant pas rencontré de difficultés en entretien partagent un fort vécu au quotidien lié à l'expérimental, *via* leur travail de recherche ou leur pratique enseignante. Proposer un travail sur des documents historiques peut être l'occasion de permettre aux enseignants de réfléchir au choix des expériences introduites dans une séquence d'enseignement et aux visées qu'ils leur associent et de constituer une aide au travail de modélisation.

confrontée aux résultats expérimentaux, aboutit à un modèle valable. On a pu constater qu'il s'agissait d'un processus long avec des difficultés théoriques (lors de l'obtention d'une modélisation convenable des forces de viscosité), des difficultés empiriques (décalage entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux ; quantité importante de formules du débit d'une canalisation, environ une centaine selon Nordon [1992] au début du XIX^e^ siècle, traduisant le manque d'une vision unifiée du phénomène), difficultés techniques (notamment concernant la mesure précise du débit dans des canalisations de diamètres variés).

Par ailleurs, les historiens parlent de « crise des années 1770 » pour évoquer les tensions entre les approches théorique et expérimentale[11] qui aboutissent à une scission, entre, d'une part, les hydrodynamiciens (académiciens) et, d'autre part, les hydrauliciens (ingénieurs, artisans maritimes). Cette crise n'est surmontée qu'au siècle suivant, avec l'introduction de la viscosité au sein du modèle, par Navier en France et par George Gabriel Stokes au Royaume-Uni, indépendamment l'un de l'autre. Ce dépassement est rendu possible en France par l'avènement de l'École polytechnique, lieu de formation d'ingénieurs où se côtoient l'approche empirique des hydrauliciens et les modèles des hydrodynamiciens régis par des équations différentielles aux dérivées partielles.

Introduire un récit historique et problématisé par l'enseignant pourrait ainsi aider l'étudiant à construire sa pensée sur le mode d'élaboration d'un modèle en physique.

Historiquement, les prémisses correspondent à la relation de Torricelli. Elles sont justifiées par la relation de Bernoulli, puis par l'équation d'Euler, elle-même généralisée par la prise en compte de la viscosité dans l'équation de Navier-Stokes. On constate que cet aperçu historique montre que l'ordre de l'avancée de la réflexion sur l'étude de l'écoulement d'un fluide est à l'opposé de l'ordre pédagogique traditionnellement retenu : le faire constater à un enseignant lui donnerait l'occasion de réfléchir à la transposition didactique à l'œuvre entre le savoir savant et le savoir enseigné (Chevallard, 1985).

---

[11] Les contradictions entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux sont telles que d'Alembert, par exemple, en vient à conclure que « la comparaison de la Théorie et de l'Expérience est peut-être impossible » (D'Alembert, cité par Hahn, 1965 : 19).

Intérêt de construire des frises historiques

De plus, se référer à une frise comme celle proposée au document 2 pourrait aider l'étudiant à structurer les étapes de construction du modèle.

De là, des frises pour les autres domaines de la physique au programme pourraient être construites et comparées, ce qui permettrait aussi à l'étudiant de constater les interactions entre domaines de la physique. Par exemple, c'est notamment l'avancée dans la modélisation des contraintes mécaniques d'un milieu élastique continu dans la première moitié du XIX^e^ siècle qui permet à Navier de construire une modélisation des forces de viscosité (Darrigol, 2002). Darrigol (2005) montre aussi comment l'analogie entre l'étude du pendule pesant et celle de l'écoulement d'un fluide permet à Huygens de tenter une première démonstration de la relation de Bernoulli, ou comment l'étude acoustique des orgues permet à Hermann von Helmholtz de proposer le concept de vorticité.

Registres sémiotiques (différentes expressions d'une loi)

Recourir à l'HS permet également d'interroger la formulation actuellement retenue pour énoncer ces relations. Par exemple, la formulation moderne de la relation de Bernoulli est $P_A + \frac{1}{2}\varrho v_A^2 + \varrho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\varrho v_B^2 + \varrho g z_B$, alors que dans l'ouvrage *Hydrodynamica*, Daniel Bernoulli l'évoque sous la forme $p = a\frac{n^2 - 1}{n^2}$, avec p la charge d'eau au-dessus de l'orifice o, a la charge et n la surface de l'orifice (voir document 3).

De plus, la formulation historique de l'équation dite d'Euler fait intervenir un système de trois équations scalaires aux dérivées partielles, la notion d'opérateurs (divergence, gradient, etc.) étant postérieure aux travaux d'Euler. La lecture du texte historique montre l'intérêt de la formalisation mathématique ultérieure pour simplifier l'écriture des équations.

Mise en parallèle de documents historiques et actuels

Par ailleurs, la mise en parallèle de la gravure du document 5 et d'images ou de vidéos actuelles met en avant la pertinence de l'approche des Bernoulli qui, dès les prémisses de l'élaboration du modèle, ont cerné la complexité de l'écoulement au voisinage des bordures, comme le montre

la représentation des lignes de courant dans la zone *IDMF* de la gravure du document 5.

La mise en parallèle d'images historiques et actuelles montre aussi la prégnance d'une référence aux situations historiques pour contextualiser un phénomène physique. De nos jours, pour assurer un écoulement dans une canalisation, on aurait recours à un robinet et non à un réservoir comme sur le document 7. Pour autant, la représentation souvent retenue dans les manuels est celle historique, sans pour autant que la référence historique ne soit explicitée par l'auteur du manuel.

Conclusion

Au travers de cet exposé, nous avons cherché à montrer en quoi l'HS est un outil utile pour réfléchir à la *NoS* et pour raviver le questionnement scientifique des élèves, mais aussi des enseignants. Le panorama historique que nous avons dressé sur une période allant du XVII^e^ au milieu du XIX^e^ siècle montre l'importance de confronter les prévisions du modèle aux résultats expérimentaux. La lecture de polycopiés récents utilisés pour la formation de futurs enseignants nous a conduit à repérer des lacunes sur ce plan et à élaborer des documents inspirés par l'HS, rapprochant des schémas et photographies à proposer aux étudiants et enseignants, afin de rappeler la nécessaire confrontation des prévisions du modèle aux résultats expérimentaux et de travailler les limites des modèles. Le panorama historique nous a également permis de montrer la fécondité des interactions entre communautés et approches différentes. Ce sont autant de points qui peuvent être choisis comme objectifs d'apprentissage épistémologiques et travaillés à l'aide de documents et conduire à la réalisation de frises ou de cartes mentales, telles celle proposées par Maurines et Beaufils (2011).

Restent en question l'élaboration des ressources (choix et rédaction des textes historiques, scénario pédagogique associé), l'appropriation par les enseignants de ces ressources et propositions, et enfin l'impact sur les élèves. Ce sont autant de pistes à explorer.

Références bibliographiques

Adúriz–Bravo Agustín, 2011. « Fostering Model-Based School Scientific Argumentation Among Prospective Science Teachers », *US-China Education Review*, 8 (5), p. 718-723.

Allchin Douglas, 2011. « Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science », *Science Studies and Science Education*, 95 (3), p. 518-542, https://doi.org/10.1002/sce.20432.

Besson Ugo, 2001. *Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Viennot, Université Paris 7.

Besson Ugo, 2004. « Students' Conceptions of Fluids », *International Journal of Science Education*, 26 (14), p. 1683-1714, https://doi.org/10.1080/09500690420002437 45.

Blondin Christiane, Closset Jean-Louis & Lafontaine Dominique, 1992. « Raisonnements naturels en hydrodynamique », *Revue française de pédagogie*, 100, p. 71-80, https://doi.org/10.3406/rfp.1992.1320

Chevallard Yves, 1985. *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble, Éditions La pensée sauvage.

Closset Jean-Louis, 1992. « Raisonnements en électricité et en hydrodynamique », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 14, p. 143-155, https://doi.org/ 10.4267/2042/9089.

Crastes Clément, 2019. *Les enseignants du supérieur et l'écoulement interne d'un fluide : modélisation et contextualisation dans différentes disciplines et filières de formation en France et aux États-Unis*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines, Orsay, Université Paris-Saclay.

Crastes Clément & Maurines Laurence, 2021. « Enseigner l'écoulement interne d'un fluide en France et aux États-Unis : modèles et contextes au travers des pratiques déclarées d'enseignants du supérieur », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, p. 59-85, https://doi.org/10.4000/rdst.3913.

Darrigol Olivier, 2002. « Between Hydrodynamics and Elasticity Theory: The First Five Births of the Navier-Stokes Equation », *Archive for History of Exact Sciences*, 56 (2), p. 95-150, https://doi.org/10.1007/s004070200000.

Darrigol Olivier, 2005. *Worlds of Flow: A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*, Oxford, Oxford University Press.

Dugas René, [1950] 1996. *Histoire de la mécanique*, Paris, Éditions Jacques Gabay.

Farwell H. W., 1944. « Loss of Head in Fluid Motion », *American Journal of Physics*, 12 (5), 307, https://doi.org/10.1119/1.1990626.

Fraser Duncan M., Pillay Reneta, Tjatindi Lawrence & Case Jenni M., 2007. « Enhancing the Learning of Fluid Mechanics Using Computer Simulations », *Journal of Engineering Education*, 96 (4), p. 381-388, https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2007.tb00946.x.

Guilbaud Alexandre, 2007. *L'hydrodynamique dans l'œuvre de D'Alembert 1766-1783 : histoire et analyse détaillée des concepts pour l'édition critique et commentée de ses* Œuvres Complètes *et leur édition électronique*, thèse de doctorat, sous la dir. de P. Crepel & M. Massot, Université Lyon 1.

Johsua Samuel, 1989. « Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 8, p. 29-53, https://doi.org/10.4267/2042/9154.

Hahn Roger, 1965. *L'hydrodynamique au XVIII^e siècle. Aspects scientifiques et sociologiques. Conférence donnée au Palais de la Découverte le 7 novembre 1964*, Paris, Palais de la Découverte.

Hodson Derek, 2008. « Exploring Nature of Science Issues: Students' Views and Curriculum Images », *Towards Scientific Literacy: A Teachers' Guide to the History, Philosophy and Sociology of Science,* Rotterdam, Sense Publishers, p. 23-40, http://doi.org/10.1163/9789087905071_003.

Hosson Cécile de, 2004. *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences. Élaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation*, thèse de doctorat, sous la dir. de W. Kaminski & J. Gayon, Université Paris 7.

Hosson Cécile de, Manrique Adry, Regad Leslie & Robert Aline, 2018. « Du savoir savant au savoir enseigné, analyse de l'exposition des connaissances en cours magistral de physique : une étude de cas », *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur*, 34 (1), https://doi.org/10.4000/ripes.1307.

Kariotoglou Petros, Koumaras Panagiotis & Psillos Dimitris, 1995. « Différenciation conceptuelle : un enseignement d'hydrostatique, fondé sur le développement et la contradiction des conceptions des élèves », *Didaskalia*, 7, p. 63-90, https://doi.org/10.4267/2042/23767.

Lederman Norman G., 2007. « Nature of Science: Past, Present, and Future », *in* S. K. Abell & N. G. Lederman (eds), *Handbook of Research on Science Education*, Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates, p. 831-879.

Martin Jay, Mitchell John & Newell Ty, 2003. « Development of a Concept Inventory for Fluid Mechanics », *in: 33rd Annual Frontiers in Education. Conference Proceedings: Engineering as a Human Endeavor: Partnering Community, Academia, Government, and Industry. The Westin Hotel, Westminster, Colorado, November 5-8, 2003. Volume 1*, Champaign, Stipes Publishing L.L.C., p. 23-28, http://doi.org/10.1109/FIE.2003.1263340.

Martinand Jean-Louis, 1993. « Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? », *Didaskalia*, 2, p. 89-99, https://doi.org/10.4267/2042/20187.

Maurines Laurence & Beaufils Daniel, 2011. « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 3, p. 271-305, https://doi.org/10.4000/rdst.444.

Maurines Laurence & Beaufils Daniel, 2013. « Teaching the Nature of Science in Physics Courses: The Contribution of Classroom Historical Inquiries », *Science & Education*, 22 (6), p. 1443-1465, https://doi.org/10.1007/s11191-012-9495-z.

Nordon Marcel, 1992. *L'eau démontrée. Du Moyen Âge à nos jours*, Paris, Masson.

Psillos Dimitris, 1999. « Teaching Fluids: Intended Knowledge and Students' Actual Conceptual Evolution », *International Journal of Science Education*, 21 (1), p. 17-38, https://doi.org/10.1080/095006999290813.

Psillos Dimitris, 2004. « An Epistemological Analysis of the Evolution of Didactical Activities in Teaching-Learning Sequences: The Case of Fluids », *International Journal of Science Education*, 26 (5), p. 555-578, https://doi.org/10.1080/09500690310001614744.

Roletto Ezio, 1998. « La science et les connaissances scientifiques : points de vue de futurs enseignants », *Aster. Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 26, p. 11-30, https://doi.org/10.4267/2042/8690.

Seeger Raymond J., 1953. « On Fluid Dynamics in Physics Teaching », *American Journal of Physics*, 21 (1), p. 29-46, https://doi.org/10.1119/1.1933340.

Slaïma Mohamed & Maurines Laurence, 2017. « La diversité des pratiques scientifiques au travers de l'histoire de la dioptrique : expérimentation d'une innovation pédagogique en classe de seconde en Tunisie », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 15, p. 169-201, https://doi.org/10.4000/rdst.1507.

Soler Léna, 2013. « Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie », *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52, p. 177-214, https://doi.org/10.3406/spira.2013.1067.

Tiberghien Andrée, 1994. « Modelling as a Basis for Analyzing Teaching-Learning Situations », *Learning and Instruction*, 4, p. 71-87.

Van Driel Jan H. & Verloop Nico, 2002. « Experienced Teachers' Knowledge of Teaching and Learning of Models and Modelling in Science Education », *International Journal of Science Education,* 24 (12), p. 1255-1272, https://doi.org/10.1080/09500690210126711.

Viennot Laurence, 1979. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris, Hermann.

Quelques exemples d'interaction entre théorie et empirie dans l'étude statistique de la turbulence (1920-1940)

Quel intérêt pour la formation et l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui ?

Antonietta Demuro

Les tensions et les rapprochements entre théorie et empirie en mécanique des fluides ont toujours animé l'histoire de ce domaine de la physique depuis le XVIII^e^ siècle. Dans cet article, nous nous proposons d'illustrer quatre exemples d'interaction entre ces deux mondes. La période concernée est la première moitié du XX^e^ siècle, plus précisément entre 1920 et 1940. Les trois premiers exemples se focalisent sur les écoulements turbulents et leur traitement statistique, d'abord en Allemagne, puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis et, enfin, en France. Le dernier exemple montre que les tensions et les rapprochements entre théorie et empirie se reflètent également dans l'enseignement de la mécanique des fluides de l'époque. À ce propos, nous présenterons les activités d'enseignement de la mécanique des fluides à l'Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL). Nous nous appuierons sur ces exemples pour questionner leur possible intérêt dans l'enseignement et la formation en mécanique des fluides d'aujourd'hui.

Mots-clés : théories statistiques de la turbulence, enseignement de la mécanique des fluides, histoire de la mécanique des fluides au XX^e^ siècle, expérimentation, laboratoires d'aérodynamique

Introduction. La mécanique des fluides : un monde entre théorie et empirie

L'histoire de la mécanique des fluides est caractérisée par une alternance de tensions et de rapprochements entre le monde théorique

– les hydrodynamiciens – et le monde empirique – les hydrauliciens – (Darrigol, 2005). Dans ce contexte de tensions, ce sont les rapprochements entre les deux mondes, théorique et empirique, qui ont favorisé l'avancement de la mécanique des fluides. En reprenant les mots d'Olivier Darrigol, l'histoire de ce domaine de la physique est « une histoire de transgressions entre les mondes pratiques et théoriques du fluide et les différentes sous-cultures qui la favorisent » (Darrigol, 2005 : VI-VII). La prise en compte de la viscosité dans le contexte des équations d'un écoulement parfait (équations d'Euler) peut être vue comme un exemple de contact entre ces deux mondes, donnant lieu, dans la première moitié du XIX^e^ siècle, aux équations de Navier-Stokes.

Malgré l'existence de nouvelles équations décrivant le mouvement des fluides visqueux, d'autres tensions entre théorie et empirie existent à cette époque. Les équations de Navier-Stokes ne peuvent être résolues que dans des cas très simples d'écoulement de fluide. De plus, les fluides peuvent avoir des caractéristiques plus complexes que celles d'un fluide visqueux : ils peuvent être turbulents. En d'autres termes, ils peuvent avoir un caractère chaotique, aléatoire, et présenter des tourbillons et des échanges d'énergies sur plusieurs échelles de longueur, jusqu'à l'échelle microscopique.

Entre la fin du XIX^e^ et le début du XX^e^ siècle, les avions arrivent, le monde de l'aviation et de l'aéronautique se développe, ainsi que celui de la météorologie et de l'océanologie. Les écoulements autour des avions sont turbulents, tout comme certains mouvements atmosphériques et de l'océan. Les équations de Navier-Stokes, qui modélisent l'écoulement d'un fluide visqueux, n'assurent pas la modélisation du caractère turbulent de l'écoulement. Il devient donc nécessaire de créer d'autres théories mathématiques et de perfectionner les instruments scientifiques, en vue de vérifier ces théories dans les souffleries et dans les laboratoires. C'est dans le contexte de l'étude des écoulements turbulents que, entre 1920 et 1940, on assiste à un nouveau point de contact entre les mondes théorique et empirique[1].

---

[1] Sans toutefois oublier que, pendant cette période, les recherches en mécanique des fluides ne concernaient pas uniquement le problème de la turbulence. D'autres

Les premières études quantitatives et statistiques sur la turbulence apparaissent au XIX^e^ siècle avec les contributions de Adhémar Barré de Saint-Venant, Joseph Boussinesq, William Thomson, et Osborne Reynolds. Poussés par des problèmes liés à la construction de nouveaux canaux et à l'amélioration de la navigabilité des fleuves, les ingénieurs français Saint-Venant et Boussinesq décrivent les problèmes hydrauliques en faisant intervenir un coefficient de viscosité turbulente ε qui concentre toute l'influence de la turbulence. En se fondant sur les analogies avec la théorie cinétique des gaz, Reynolds précise les conditions pour un écoulement turbulent et décrit la transition d'un régime laminaire à un régime turbulent (Darrigol, 2005 : 219-263). Dans une note publiée en 1895, il propose une décomposition du mouvement du fluide continu u (*mean motion*) en la somme du mouvement moyen $\overline{u}$ (*mean mean motion*) et un mouvement d'agitation turbulente u' (*relative mean motion*).

La décomposition de Reynolds amène à des équations pour un écoulement turbulent similaires aux équations de Navier-Stokes, sauf pour un terme additionnel $\rho\overline{u'_i u'_j}$ lié au caractère turbulent du fluide. Entre 1920 et 1940, ces idées ont ouvert la voie d'abord aux modèles semi-empiriques, puis aux modèles statistiques de la turbulence développée[2].

Dans cet article, nous nous proposons d'illustrer quatre exemples d'interaction entre théorie et empirie dans la mécanique des fluides de la première moitié du XX^e^ siècle. Les trois premiers exemples se focalisent sur les écoulements turbulents et leur traitement statistique, d'abord en Allemagne, puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis et, enfin, en France. Le dernier exemple montre que les tensions et les rapprochements entre théorie et empirie se reflètent également dans l'enseignement

---

travaux portaient, par exemple, sur la théorie de la résistance d'un fluide parfait autour d'un obstacle et sur l'étude des mouvements des fluides visqueux.

[2] L'histoire de la turbulence au XX^e^ siècle est caractérisée par deux types de problème : l'étude de l'origine de la turbulence et l'étude de la turbulence développée. Le premier problème, abordé entre 1900 et 1940, porte sur la manière dont les écoulements d'un fluide passent d'un régime laminaire à un régime turbulent pour des nombres croissants de Reynolds. Le deuxième problème, qui sera traité dans cet article, se focalise sur l'étude d'un écoulement complètement turbulent. Sur un aperçu général sur l'histoire de la théorie de la turbulence, voir par exemple : Farge, 1992.

de la mécanique des fluides de l'époque. À ce propos, nous analyserons les activités d'enseignement de la mécanique des fluides à l'Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL). Ces exemples nous serviront d'appui pour alimenter le questionnement, déjà existant en didactique de la physique, sur la présence d'un éventuel fossé entre théorie et empirie dans les pratiques enseignantes du supérieur d'aujourd'hui, supposé de même nature que celui observé dans l'histoire de la mécanique des fluides antérieure au XX[e] siècle (Crastes, 2019 : 89). À quel moment ces développements récents vont-ils être pris en compte en France, à la fois dans la recherche mais aussi dans l'enseignement ? De quelle manière ? Quelle évolution cela traduit-il dans les méthodes d'enseignement de la mécanique des fluides ?

Introduire des constantes expérimentales dans les équations d'un écoulement turbulent entre deux parois : les méthodes semi-empiriques de Prandtl et de von Kármán

Comment interpréter le terme non linéaire $\tau = \varrho\overline{u'_i u'_j}$ des équations de Navier-Stokes généralisées, afin de déterminer le profil de vitesse pour un écoulement turbulent à deux dimensions limitées par deux parois ? Cette question est à la base des théories semi-empiriques inaugurées par Ludwig Prandtl (1875-1953) et Theodore von Kármán (1881-1963) autour des années 1920. Entre 1925 et 1946, Prandtl est directeur de l'Institut de mécanique des fluides Kaiser-Wilhelm à Göttingen (devenu depuis Institut Max-Planck), un centre de recherche aérodynamique de renommée internationale accueillant des ingénieurs avec une solide formation mathématique et soucieux de l'importance de la vérification des résultats théoriques d'un point de vue expérimental. C'est à cet ingénieur allemand que l'on doit la notion de couche limite dans le problème d'un corps solide immergé dans un fluide[3]. En 1912, von Kármán, étudiant de Prandtl, quitte Göttingen pour accepter un poste de directeur à l'Institut d'aérodynamique de l'Université technique d'Aix-la-Chapelle. C'est la compétition entre Prandtl et von Kármán pour déduire une

[3] Sur Prandtl, ses activités de mécanique des fluides dans le laboratoire de Göttingen et sa théorie de la couche limite, voir : Eckert, 2006.

loi universelle du profil de la vitesse d'un écoulement turbulent qui les amène à la création de quelques méthodes semi-empiriques pour traiter la turbulence[4].

Entre 1924 et 1925, Prandtl s'inspire des idées de Reynolds et de Boussinesq pour étudier les équations pour un écoulement turbulent bidimensionnel de fluide non homogène sur deux plaques planes, où x est la direction moyenne de déplacement. En décomposant la vitesse (u,v) en mouvement moyen et en mouvement d'agitation turbulente du fluide :

$$u = \overline{u} + u' \; ; \; v = \overline{v} + v'$$

les équations du mouvement du fluide turbulent pour la composante x de la vitesse u prendront la forme suivante :

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} + \overline{u}\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = \frac{1}{\varrho}\frac{\partial}{\partial x}\left(P + \overline{\varrho u^2} - \mu\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}\right) + \frac{1}{\varrho}\frac{\partial}{\partial y}(\mu\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - \varrho\overline{u'v'})$$

où ϱ est la densité, P la pression, μ le coefficient de viscosité cinématique du fluide et $\tau = \varrho\overline{u'v'}$ le terme non linéaire dû à la présence d'une composante d'agitation turbulente (Battimelli, 1986 : 9). Sous ces conditions, les fluctuations transversales de la vitesse v, qui suivent la direction y, se superposent au mouvement moyen u, qui suit statistiquement la direction x. En 1877, Boussinesq avait représenté le terme additionnel $\tau = \varrho\overline{u'v'}$ sous la forme $\varrho\varepsilon\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right)$, où ε, la viscosité turbulente, est une quantité inconnue qui dépend de la particularité du fluide turbulent. L'idée de Prandtl est de remplacer le coefficient ε de Boussinesq par une expression testée expérimentalement :

$$\varepsilon = l^2\left|\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right|$$

où l est une longueur caractéristique appelée « parcours de mélange » qui établit l'échelle des fluctuations des vitesses. Prandtl détermine cette longueur en faisant des analogies avec la théorie cinétique des gaz et en traitant les particules du fluide turbulent comme des molécules en collision. D'après

---

[4] Sur la compétition entre Prandtl et von Kármán pour déduire une loi universelle du profil de la vitesse d'un écoulement turbulent, voir : Bodenshatz & Eckert, 2011. Sur une analyse mathématique détaillée de la contribution de Prandtl et de von Kármán aux théories semi-empiriques de la turbulence, voir également : Battimelli, 1986.

ce rapprochement, le parcours de mélange l est une longueur caractéristique des fluctuations transversales de la vitesse turbulente qui joue, dans l'étude de la turbulence, le même rôle que le parcours libre moyen dans la théorie cinétique du gaz. Les distributions théoriques de la vitesse du fluide obtenues par cette approche sont en excellent accord avec les mesures expérimentales obtenues par l'ingénieur Walter Tollmien au sein du laboratoire d'aérodynamique de Göttingen dirigé par Prandtl (1927 : 18-21).
Quelques années plus tard, von Kármán assume les hypothèses de similarité pour les fluctuations de la vitesse et détermine le parcours de mélange l comme une quantité proportionnelle aux dérivées premières et secondes de la vitesse moyenne $\overline{u}$ autour de $y = 0$. Cela lui permet de dépasser les difficultés de trouver l expérimentalement et d'expliciter le profil de vitesse U de l'écoulement d'un fluide turbulent entre deux parois parallèles de hauteur h avec une contrainte de cisaillement τ_0 au niveau des parois :

$$U = U_{max} + \frac{1}{k}\sqrt{\frac{\tau_0}{\varrho}}\left(\log\left(1-\sqrt{\frac{y}{h}}\right)+\sqrt{\frac{y}{h}}\right)$$

où la constante k est la seule constante à déterminer expérimentalement. Ces résultats seront confirmés par les ingénieurs de son laboratoire et par l'ingénieur Johann Nikuradse du laboratoire d'aérodynamique de Göttingen (Kármán, 1931 : 20-21).

Les travaux de Prandtl et de von Kármán représentent une tentative d'élaborer des théories en accord avec l'empirie. Cependant, les solutions théoriques obtenues dépendent encore de constantes empiriques, à savoir le parcours de mélange l et la constante k de von Kármán. Cela pose des limites pour des cas plus complexes, puisque ces constantes doivent être déterminées expérimentalement pour chaque configuration du fluide. Comment procéder, par exemple, dans le cas d'un écoulement sans parois et homogène ?

Créer des théories mathématiques en accord avec les expérimentations : la théorie statistique de la turbulence de Taylor

La théorie statistique de la turbulence est inaugurée par Geoffrey Ingram Taylor (1886-1975) pendant les années 1920. Ce physicien anglais, passionné par la météorologie et par l'océanologie, effectue diverses

observations liées à ces deux domaines, en s'intéressant aux phénomènes turbulents de l'atmosphère et aux propriétés de diffusion des particules produite par les fluctuations de la vitesse turbulente. Suite à la tragédie du Titanic en 1912, il prend part à l'expédition scientifique organisée par le gouvernement britannique pour étudier le problème des icebergs dans l'Atlantique Nord. À bord du bateau Scotia en tant que météorologiste, il recueille des données pour mesurer la distribution verticale de la température, la distribution de la vitesse du vent et le processus de diffusion turbulente de la chaleur et de l'humidité[5]. Durant la Première Guerre mondiale, il est mobilisé à la Royal Aircraft Factory pour conduire des travaux d'aéronautique. En 1923, il est nommé *Yarrow Research Professor* de la Royal Society, ce qui lui permet de consacrer ses activités totalement à la recherche en mécanique des fluides et en mécanique des solides, sans dispenser d'enseignement.

Les premières traces de sa théorie statistique de la turbulence se trouvent dans un article publié en 1922 dans la revue *Proceedings of the London Mathematical Society*, où il donne une interprétation mathématique aux processus de diffusion turbulente (Taylor, 1922). Afin d'étudier le mouvement horizontal d'une particule de fluide turbulent $u(t)$ qui se déplace horizontalement et aléatoirement à gauche et à droite à chaque instant t, Taylor emprunte à la statistique la fonction de corrélation pour décrire la corrélation, d'un point de vue lagrangien, entre les fluctuations irrégulières de la vitesse en deux instants successifs t et $t+\xi$:

$$R_\xi = \frac{\overline{u'_t u'_{t+\xi}}}{\sqrt{\overline{u^2}}}$$

Cette relation lui permet de déduire, dans le problème de diffusion turbulente, la loi de distribution moyenne des particules de fluide, initialement concentrées en un point et qui traversent une distance X durant un intervalle de temps T.

Ce travail, publié dans une revue académique adressée à des mathématiciens, attirera l'attention des praticiens dix ans plus tard. C'est seulement à partir des années 1930 que les laboratoires d'aérodynamiques

---

[5] Sur Taylor, voir : Sreenivasan, 2011. Sur une analyse mathématique détaillée de sa contribution à la théorie statistique de la turbulence, voir également : Battimelli, 1986.

allemands, anglais, français et américains commencent à s'intéresser au travail de Taylor, dans un contexte où la nature des problèmes change et au cours duquel les expérimentateurs perfectionnent leurs techniques d'utilisation des anémomètres à fil chaud, afin d'effectuer des mesures plus précises des fluctuations irrégulières de la vitesse turbulente en deux instants successifs.

Les deux notes de Taylor parues en 1935 et 1938 développent les idées contenues dans l'article publié en 1922 et rencontrent un grand succès auprès des expérimentateurs (Taylor, 1935 et 1938). Dans la note de 1935, Taylor étudie le concept d'échelle de la turbulence pour pouvoir traiter le phénomène turbulent comme un transfert continu d'énergie cinétique du tourbillon de taille la plus grande (à l'échelle la plus grande) au tourbillon de taille la plus petite (échelle la plus petite), où les effets de viscosité gagnent sur ceux de l'énergie cinétique et causent la dissipation du tourbillon. Dans la même note, il simplifie les équations du problème de la dissipation de l'énergie des tourbillons en formulant l'hypothèse de turbulence isotrope, selon laquelle les fluctuations de la vitesse sont statistiquement les mêmes dans toutes les directions. Contrairement à sa note de 1922, les résultats de Taylor sur la dissipation d'énergie et sur l'hypothèse de turbulence isotrope trouvent un moyen de connecter la fonction de corrélation à des propriétés qui peuvent être mesurées en laboratoire ; et ce grâce aussi au perfectionnement des anémomètres à fil chaud réalisé par l'équipe de Hugh L. Dryden au National Bureau of Standards et par l'équipe de L. F. G. Simmons au National Physical Laboratory.

Dans la note publiée en 1938, Taylor introduit la notion de spectre de la turbulence $F(\omega)$ pour étudier la répartition de l'énergie sur toutes les échelles de fréquence ω. Si les variations de la vitesse u d'un écoulement sont dues à des tourbillons produits par un courant d'air de vitesse U, le spectre peut être mis en relation avec la fonction de corrélation R_x des fluctuations de u en deux points différents à distance x:

$$F(\omega) = \frac{4}{U}\int_0^{\infty} R_x \cos\frac{2\pi\omega x}{U}\, dx$$

Cette relation sera confirmée par les expérimentations menées au National Bureau of Standards et au National Physical Laboratory (voir

Figure 1). La théorie de Taylor sera généralisée au cas tridimensionnel par von Kármán qui, pendant les années 1930, avait quitté l'Allemagne pour accepter un poste de directeur au Guggenheim Aeronautical Laboratory du California Institute of Technology (GALCIT), à Pasadena.

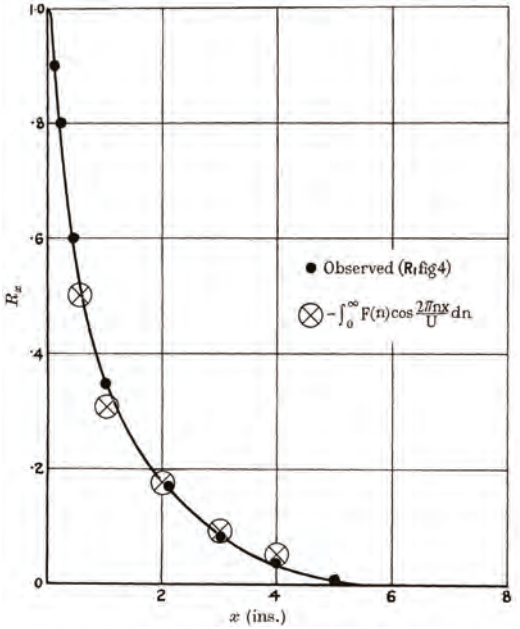


Figure 1 – Les mesures de R_x réalisées au National Physical Laboratory et les valeurs de R_x calculées à partir de $F(\omega)$

Source : Taylor, 1938 : 481.

La théorie statistique de la turbulence de Taylor-von Kármán témoigne d'une volonté d'élaborer des théories mathématiques de la mécanique des fluides les plus proches possible de l'expérimentation et des problèmes concrets de l'aéronautique, de la météorologie et de l'aviation impliquant la prise en compte d'un écoulement turbulent. On peut évoquer comme exemple l'évolution des résultats théoriques de Taylor entre sa note de 1922 et sa note de 1935 à propos de la fonction de corrélation et ses propriétés mesurables dans le problème de la dissipation de l'énergie si

l'hypothèse d'isotropie est assumée. Le perfectionnement des instruments permet de mesurer les fluctuations de la vitesse en deux instants successifs de la fonction de corrélation à l'aide d'anémomètres toujours plus précis. De plus, les souffleries peuvent produire artificiellement une turbulence isotrope nécessaire pour simplifier le nombre d'inconnues intervenant dans le problème de dissipation des tourbillons. La nature du problème de la turbulence change : l'étude des fluides non homogènes entre deux parois est maintenant remplacée par l'étude de fluides homogènes, isotropes et loin de parois.

La théorie statistique de Taylor-von Kármán sera acceptée, développée et généralisée par les ingénieurs, les physiciens et les mathématiciens d'Allemagne, de Grande Bretagne, des Pays-Bas et des États-Unis. Et en France, qu'en est-il ?

Traiter la vitesse d'un écoulement comme une variable aléatoire pour avoir des données plus conformes à l'expérience : la théorie de Wehrlé et Dedebant

En France, en 1935, l'étude théorique et expérimentale de la turbulence est confiée à la Commission de la turbulence atmosphérique, une commission fondée par le ministère de l'Air et présidée par Philippe Wehrlé (1890-1965), directeur de l'Office national météorologique (ONM)[6]. Elle comprenait des collaborateurs de l'ONM, des ingénieurs de l'aéronautique ainsi que divers professeurs de mécanique des fluides comme Albert Métral, Henri Bénard et Joseph Kampé de Fériet (1893-1982). Au sein de cette commission, les études statistiques de la turbulence suscitent la création d'un groupe de recherche autour de Wehrlé et de Georges Dedebant (1902-1965), directeur du service de recherche de l'ONM et membre aussi de la Commission.

En partant de leur expérience dans le domaine de la météorologie et ses applications dans l'aviation, Wehrlé et Dedebant élaborent une théorie visant à réinterpréter en langage aléatoire les idées de Taylor et

[6] Fondé en 1921 afin d'unifier une grande partie des services météorologiques français, l'ONM a été rattaché au ministère de l'Air en 1930. Sur une histoire de l'ONM, voir : Roy, 2012.

de von Kármán sur le problème de la turbulence développée. En supposant le point de vue de Leonhard Euler où les mesures de la vitesse sont faites sur un réseau de points P fixes dans l'espace, Wehrlé et Dedebant décomposent le mouvement turbulent d'un fluide stationnaire :

$$v(P) = \overline{v(P)} + v'(P)$$

où $\overline{v(P)}$ est la valeur moyenne de la vitesse en P obtenue en prolongeant la mesure sur un intervalle de temps assez long pour que $\overline{v(P)}$ garde la même valeur (fluide stationnaire). Cette valeur moyenne varie d'ailleurs d'un point P à un autre de manière que le mouvement moyen soit défini par un champ de vitesse indépendant de t, mais dépendant de (x,y,z). $v'(P)$ désigne la composante turbulente de la vitesse qui a défilé dans un petit volume entourant P pendant un intervalle de temps considéré. Si la valeur moyenne de la vitesse $\overline{v(P)}$ est une fonction continue et dérivable de (x,y,z), Wehrlé et Dedebant refusent de traiter la composante d'agitation $v'(P)$ comme une fonction continue et dérivable, contrairement à leurs prédécesseurs Taylor et von Kármán. Les deux ingénieurs français suppriment cette hypothèse de régularité pour étudier $v'(P)$ comme une variable aléatoire, plus précisément comme un champ de variables aléatoires qui varient d'un point P à l'autre et dans le temps t. D'après eux, l'étude de la vitesse turbulente à partir de courbes de fréquence de la vitesse obtenues expérimentalement devrait permettre de conserver la nature aléatoire de la turbulence et d'obtenir ainsi des données plus conformes à l'expérience.

À partir de ces idées, Wehrlé et Dedebant construisent une théorie sans envisager $v'(P)$ comme une courbe régulière qui décrit le mouvement des fluides turbulents et en s'appuyant sur une « analyse aléatoire ». Plus précisément, ils étendent les règles de l'analyse classique pour introduire les notions de « dérivée aléatoire » et d'« intégrale aléatoire », nécessaires pour pouvoir réécrire les équations du mouvement du fluide sans passer par l'utilisation de dérivées classiques[7]. Les résultats théoriques sont en accord avec les résultats expérimentaux réalisés à l'IMFL. Ces expérimentations

[7] Pour plus de détails sur l'école de Wehrlé et Dedebant et leur théorie développée au sein de la Commission de la turbulence atmosphérique, voir : Demuro, 2020.

sont possibles grâce à la collaboration scientifique entre l'ONM et l'IMFL établie dans le cadre de la Commission de la turbulence atmosphérique. Le directeur de l'IMFL, Kampé de Fériet, mathématicien et spécialiste au niveau international dans l'étude de la turbulence depuis les années 1930, avait participé activement à l'évolution expérimentale de cette théorie en prenant part aux prises de mesures aérologiques de Wehrlé et Dedebant sur le terrain et en mettant à disposition les souffleries de l'IMFL pour vérifier certains de leurs résultats théoriques[8]. Les éléments principaux de la théorie de Wehrlé et Dedebant seront présentés par Kampé de Fériet lors du Congrès international de mécanique appliquée (*International Congress of Applied Mechanics* [ICAM]) de Cambridge en 1938, sur la proposition de von Kármán et devant les spécialistes de la turbulence les plus renommés de l'époque à savoir Taylor, Prandtl et le même von Kármán.

Après les années 1940-1945, les idées de Wehrlé et Dédebant deviennent de plus en plus abstraites et plus proches de questions philosophiques que scientifiques. Ils s'appuieront sur leur théorie de l'analyse aléatoire pour construire « une mécanique aléatoire » visant à généraliser la mécanique classique, et dont la théorie statistique de la turbulence n'est qu'un cas particulier. Ces idées déboucheront sur le concept d'« univers aléatoire » et sur la réinterprétation de toutes les branches de la physique au moyen de l'analyse aléatoire. Leurs recherches deviendront de plus en plus marginales jusqu'à être oubliées à la fin de la Seconde Guerre mondiale par leurs contemporains et successeurs.

---

[8] Contrairement au plan expérimental, le rôle de Kampé de Fériet vis-à-vis de la théorie de Wehrlé et de Dedebant reste assez marginal en ce qui concerne le développement mathématique de leurs résultats. À partir de la fin des années 1930, Kampé de Fériet donnera une contribution mathématique à la théorie statistique de la turbulence en s'appuyant sur une approche probabiliste qui s'éloignera de celle de Wehrlé et de Dedebant. Sa théorie sera acceptée et reconnue au niveau international, surtout après la Seconde Guerre mondiale, en particulier dans le milieu américain autour de von Kármán. Sur la trajectoire scientifique de Kampé de Fériet et sur les activités de l'IMFL pendant l'entre-deux-guerres, voir : Demuro, 2018 et 2020.

Entre théorie et pratique dans l'enseignement de la mécanique des fluides en France entre 1920 et 1940 : le cas de l'Institut de Lille

Les interactions entre théorie et pratique concernent non seulement la recherche en mécanique des fluides, mais aussi l'enseignement de cette discipline. Avant la Première Guerre mondiale, sauf quelques exceptions[9], il existe très peu de laboratoires expérimentaux où la recherche et l'enseignement de la mécanique des fluides tissent des liens avec les aspects les plus pratiques de la discipline. Les enseignants des universités restent dans la tradition des ingénieurs-savants qui donne de l'importance au rôle des mathématiques dans les théories de la mécanique des fluides. À titre d'exemple, la chaire d'aéronautique de la faculté des sciences de Paris propose des cours principalement théoriques qui comprennent exceptionnellement des enseignements plus pratiques. Il en va de même pour les ingénieurs des grandes écoles et de l'École polytechnique. Face à la crise de l'aéronautique française qui se manifeste après la Première Guerre mondiale, la position du ministère de l'Air est assez claire : combler les lacunes en mécanique des fluides signifie rattraper le retard scientifique et technologique que l'aéronautique avait accumulé par rapport aux pays voisins. Ces lacunes sont aussi liées, d'après le ministre de l'Air Laurent Eynac, à la place marginale laissée aux expérimentations dans les universités françaises :

> En ce qui concerne les problèmes relatifs à la sustentation même des avions, la question se présentait plus complexe [par rapport aux autres secteurs scientifiques susceptibles de contribuer aux recherches de l'aviation (métallurgie, mécanique, physique et chimie)], puisqu'il fallait créer le cadre même des recherches qu'ils nécessitent ; la mécanique des fluides tout au moins sous son aspect expérimental n'occupait en effet dans les Universités françaises qu'une place extrêmement réduite vis-à-vis de ce qui serait nécessaire pour fournir les bases des perfectionnements à rechercher[10].

---

9 À titre d'exemple : les laboratoires d'aérodynamique Eiffel et l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr, les laboratoires d'hydraulique de Nancy, de Grenoble et de Toulouse et l'Institut industriel du Nord (IDN).

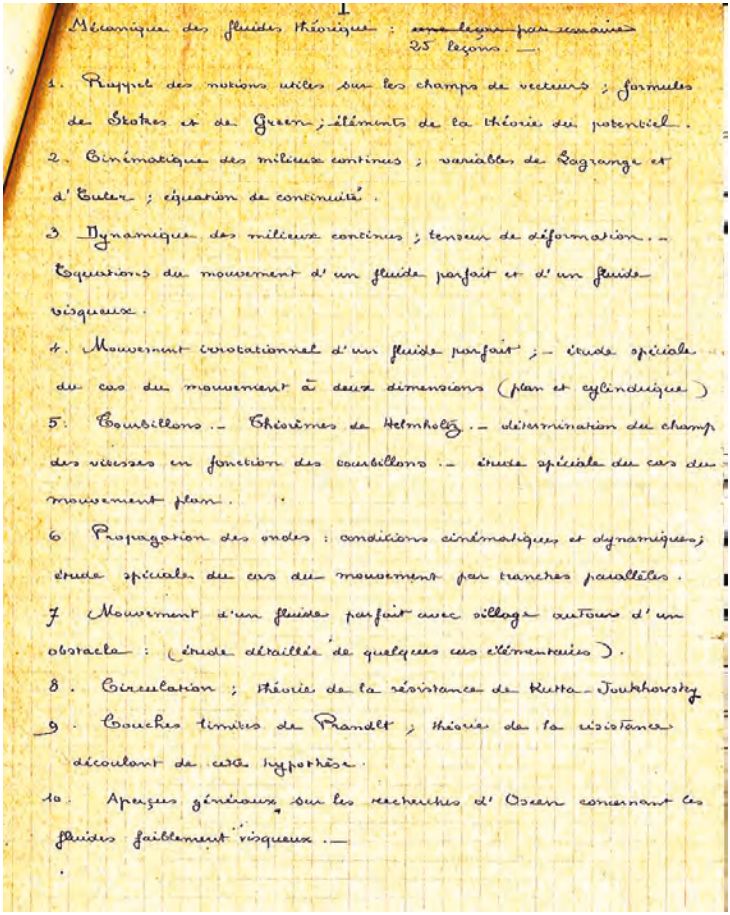
10 Circulaire du ministre de l'Air, 22 mai 1929, Archives de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) de Lille.

C'est dans le contexte du développement de l'aviation et du besoin de promouvoir la recherche aéronautique nationale qu'on voit apparaître, entre 1923 et 1929, les premiers instituts de mécanique des fluides (Lille, Marseille, Paris et Toulouse) et les premiers centres d'enseignement (Strasbourg, Poitiers, Nantes, Caen, Lyon). Dans ce processus d'étatisation de la mécanique des fluides et de l'aéronautique, le ministère de l'Air prévoyait un renforcement de la recherche, mais aussi de l'enseignement de la mécanique des fluides expérimentale, dans la logique d'un équilibre entre cours théoriques, cours expérimentaux et travaux pratiques liés à l'aviation. Grâce à une convention entre le ministère de l'Air et les facultés des sciences concernées par la création de ces établissements, un certificat de mécanique des fluides, commun aux instituts et aux centres d'enseignement, est alors mis en place. Une deuxième initiative du ministère de l'Air porte sur l'organisation d'un concours national entre les étudiants des différentes universités, dans le but de conserver les liens entre les instituts (Charru, 2021 : 93).

Dans la plupart de ces centres, l'enseignement de la mécanique des fluides théorique est confié à un mathématicien professeur, alors que l'enseignement de la mécanique des fluides expérimentale est assuré par un physicien chef des travaux ou maître de conférences. À Lille, Paris et Marseille, ces mathématiciens sont aussi directeurs de leurs instituts. À l'IMFL – déjà rencontré dans la section précédente pour ses collaborations scientifiques avec l'ONM visant à légitimer d'un point de vue expérimental la théorie de Wehrlé et Dedebant –, comme dans les autres instituts de mécanique des fluides affiliés au ministère de l'Air, les cours sont assurés par des professeurs ayant des approches variées, selon leur spécialité en mécanique des fluides, théorique, expérimentale ou pratique. L'enseignement de la mécanique des fluides théorique est conféré à Kampé de Fériet, en tant que titulaire de la chaire de mécanique des fluides et directeur de l'institut, alors que André Martinot-Lagarde, en tant que maître de conférences de mécanique des fluides, assure la direction des travaux pratiques des élèves, ainsi que l'enseignement du cours de mécanique des fluides expérimentale et aérodynamique appliquée à l'aviation.

Durant l'entre-deux-guerres, le programme d'enseignement de l'IMFL et des autres instituts de mécanique des fluides prévoyait un enseignement de base et un enseignement complémentaire. Les contenus de

l'enseignement de base sont établis au niveau national sous la supervision du directeur général technique du ministère de l'Air, Albert Caquot. La proportion des cours théoriques et des cours plus pratiques était équilibrée dans l'enseignement de base de l'IMFL. Les 25 leçons annuelles de mécanique des fluides théoriques étaient accompagnées par 25 leçons annuelles de mécanique des fluides expérimentale et par 25 leçons d'aérodynamique appliquée à l'aviation. Cet enseignement était destiné aux étudiants de la faculté des sciences de Lille préparant le certificat de mécanique des fluides, ainsi qu'aux étudiants de deuxième et troisième année de la section d'aéronautique de l'IDN. D'autres étudiants pouvaient participer à ces cours, notamment les étudiants préparant le diplôme d'université de mécanique des fluides, un certificat délivré aux étudiants qui ne possédaient pas le titre universitaire requis pour la licence ès sciences, mais qui en même temps aspiraient à accéder au personnel technique de l'aéronautique. L'institut accueillait également des étudiants de troisième année de l'École nationale supérieure des arts et métiers pour effectuer des manipulations dans les laboratoires. Contrairement à l'enseignement de base, l'enseignement complémentaire bénéficiait d'une plus ample liberté de choix dans les sujets à traiter et pouvait varier d'un institut de mécanique des fluides à l'autre. À l'IMFL, cet enseignement incluait des cours d'aérodynamique et d'hydrodynamique supérieure. En particulier à partir de l'année 1933-1934, l'enseignement complémentaire est centré sur des sujets concernant l'étude de la turbulence, domaine de prédilection de l'institut pendant l'entre-deux-guerres. L'enseignement complémentaire est adressé aux étudiants de la faculté des sciences candidats à l'agrégation et aux futurs chercheurs préparant le certificat d'aérodynamique et hydrodynamique supérieures (équivalent au diplôme d'études supérieures). Les extraits du programme d'enseignement de l'IMFL (voir Figures 2, 3 et 4) montrent les efforts institutionnels de l'IMFL dans le renforcement des enseignements expérimentaux de la mécanique des fluides par rapport aux théoriques.

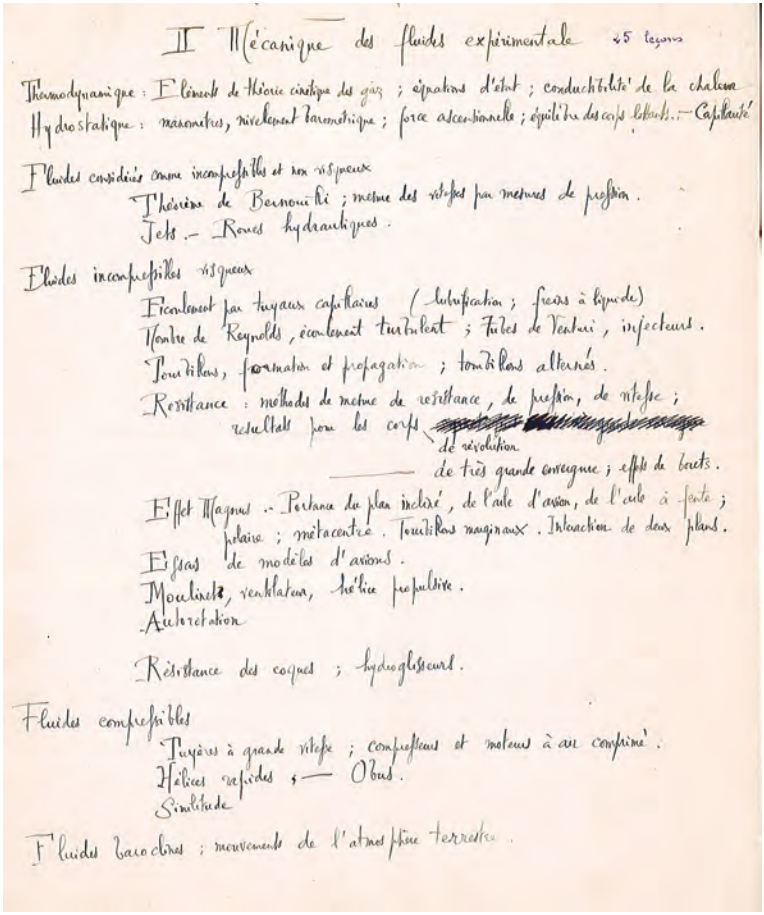


Mécanique des fluides théorique : ~~une leçon par semaine~~ 25 leçons. —

1. Rappel des notions utiles sur les champs de vecteurs ; formules de Stokes et de Green ; éléments de la théorie du potentiel.
2. Cinématique des milieux continus ; variables de Lagrange et d'Euler ; équation de continuité.
3. Dynamique des milieux continus ; tenseur de déformation. — Equations du mouvement d'un fluide parfait et d'un fluide visqueux.
4. Mouvement irrotationnel d'un fluide parfait ; — étude spéciale du cas du mouvement à deux dimensions (plan et cylindrique)
5. Tourbillons. — Théorèmes de Helmholtz. — détermination du champ des vitesses en fonction des tourbillons. — étude spéciale du cas du mouvement plan.
6. Propagation des ondes : conditions cinématiques et dynamiques ; étude spéciale du cas du mouvement par tranches parallèles.
7. Mouvement d'un fluides parfait avec sillage autour d'un obstacle : (étude détaillée de quelques cas élémentaires).
8. Circulation ; Théorie de la résistance de Kutta-Joukhowsky
9. Couches limites de Prandtl ; théorie de la résistance découlant de cette hypothèse.
10. Aperçus généraux sur les recherches d'Oseen concernant les fluides faiblement visqueux. —

Figure 2 – Programme du cours de mécanique des fluides théorique de l'IMFL

Source : Archives de l'ONERA de Lille.


II Mécanique des fluides expérimentale 45 leçons

Thermodynamique : Eléments de théorie cinétique des gaz ; équations d'état ; conductibilité de la chaleur
Hydrostatique : manomètres, nivellement barométrique ; force ascensionnelle ; équilibre des corps flottants. – Capillarité

Fluides considérés comme incompressibles et non visqueux
Théorème de Bernoulli ; mesure des vitesses par mesures de pression.
Jets. – Roues hydrauliques.

Fluides incompressibles visqueux
Ecoulement par tuyaux capillaires (lubrification ; freins à liquide)
Nombre de Reynolds, écoulement turbulent ; Tubes de Venturi, injecteurs.
Tourbillons, formation et propagation ; tourbillons alternés.
Résistance : méthodes de mesure de résistance, de pression, de vitesse ;
résultats pour les corps [redacted] de révolution
——— de très grande envergure ; effet de bouts.
Effet Magnus : Portance du plan incliné, de l'aile d'avion, de l'obus à fonte ; polaire ; métacentre. Tourbillons imaginaux. Interaction de deux plans.
Essais de modèles d'avions.
Moulinets, ventilateurs, hélice propulsive.
Autorotation

Résistance des corps ; hydroglisseurs.

Fluides compressibles
Tuyères à grande vitesse ; compresseurs et moteurs à air comprimé.
Hélices rapides ; — Obus.
Similitude

Fluides baroclines ; mouvements de l'atmosphère terrestre.

Figure 3 – Programme du cours de mécanique des fluides expérimentale de l'IMFL

Source : Archives de l'ONERA de Lille.

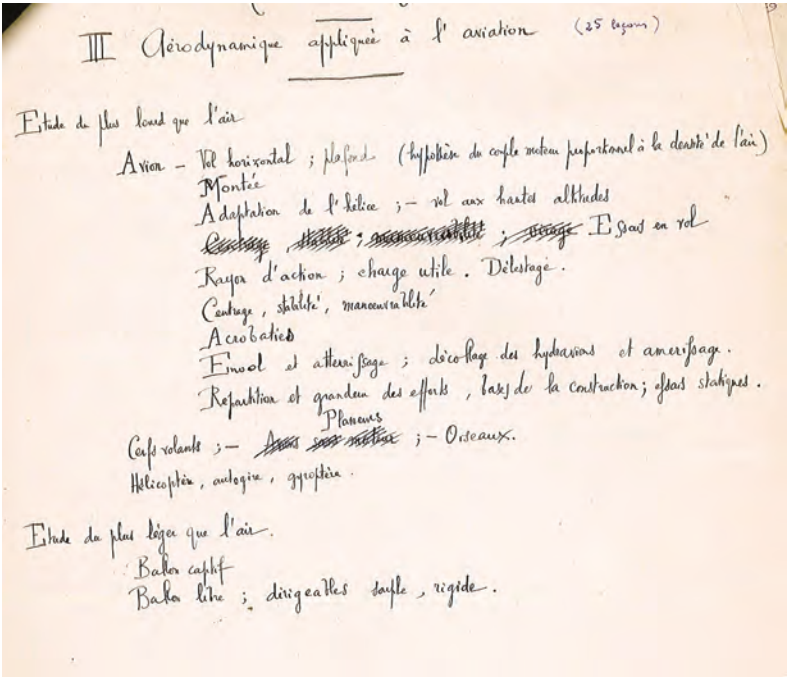


Figure 4 – Programme du cours d'aérodynamique appliquée à l'aviation de l'IMFL

Source : Archives de l'ONERA de Lille.

Conclusion. Quel intérêt pour la formation et l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui ?

Dans la plupart des cours de mécanique des fluides des universités d'aujourd'hui, l'étude des écoulements progresse de celle des écoulements parfaits à celle plus complexe des écoulements visqueux, et s'étend parfois jusqu'à la théorie de la couche limite de Prandtl. Cette progression aborde des contenus théoriques construits et développés dans l'histoire de la mécanique des fluides entre le XVII^e^ et le XIX^e^ siècle, et parfois jusqu'au début du XX^e^ siècle. C'est de cette période dont relèvent les principaux éléments présentés dans un cours introductif de mécanique des fluides au niveau du

premier cycle de l'enseignement supérieur. En inscrivant ses recherches sur les pratiques enseignantes de la modélisation en France et aux États-Unis dans le champ de la *Nature of Science* (NoS), le didacticien de la physique Clément Crastes se demande, entre autres, si les reliquats du fossé entre théorie et expérimentation caractérisant l'histoire de la mécanique des fluides entre le XVII^e^ et le XIX^e^ siècles sont encore présents aujourd'hui dans l'enseignement supérieur de la mécanique des fluides :

> Il s'agit par exemple de la difficulté d'associer prévisions théoriques et données expérimentales. Le fait qu'historiquement, le développement théorique des hydrodynamiciens du XVIII^e^ siècle se soit construit de manière plus ou moins déconnectée des données obtenues par les hydrauliciens interroge également le recours à l'expérimental que les enseignants déclarent employer en mécanique des fluides. L'approche retenue pour enseigner cette discipline est-elle déconnectée d'un recours à l'expérimental ? De plus, les enseignants suivent-ils la démarche historique des hydrodynamiciens, à savoir débuter l'étude des écoulements en négligeant la viscosité pour ensuite en tenir cas, face aux contradictions entre prévisions théoriques et résultats expérimentaux observés ? Par ailleurs, les problématiques originelles (approvisionnement en eau, etc.) ayant mené à la construction de ce savoir qu'est la mécanique des fluides sont-elles évoquées par les enseignants interrogés ? Les interactions entre la communauté des chercheurs en mécanique des fluides et la société sont-elles reprises ? (Crastes, 2019 : 89)

Dans notre article, nous avons présenté quelques exemples d'interaction entre théorie et empirie dans l'étude d'un écoulement turbulent durant la première moitié du XX^e^ siècle. Quelle place donner à l'histoire de la théorie de la turbulence par rapport aux analyses didactiques déjà effectuées pour les écoulements parfaits et visqueux ? Les exemples historiques évoqués pourraient-ils apporter de nouveaux éléments au questionnement actuel à propos de l'existence d'un fossé entre théorie et empirie dans les pratiques enseignantes d'aujourd'hui ? L'enseignement reproduit-il la démarche historique jusqu'au cas des écoulements turbulents ? Dans l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui, quelle place est faite à l'histoire de la découverte de la turbulence ? Ce chapitre de l'histoire de la mécanique des fluides pourrait-il être exploité dans la formation des enseignants du supérieur afin de leur permettre de réfléchir sur leurs pratiques ? Nous

n'avons pas la prétention de donner une réponse à ces questions relevant de la didactique de la physique.

Nous souhaitons néanmoins nous appuyer sur les exemples historiques évoqués dans notre article pour souligner l'importance de certains aspects à prendre en compte dans l'éventualité d'un intérêt didactique à l'égard de l'histoire de la théorie de la turbulence de la première moitié du XX^e^ siècle. Tout d'abord, comparée aux théories d'hydrodynamiques des siècles passés, l'histoire des théories de la turbulence est celle d'un phénomène complexe présentant encore aujourd'hui des questions ouvertes en termes de modélisation. Les équations de Navier-Stokes peuvent être résolues principalement dans le cas de configurations extrêmement simplifiées. À ce jour, il n'y a pas encore une théorie complète de la turbulence développée. D'autres difficultés sont dues à l'existence de plusieurs échelles et à la présence d'outils mathématiques non élémentaires empruntés aux théories modernes de calcul des probabilités et des statistiques. Dans cet article, nous avons par exemple évoqué la fonction de corrélation décrivant les fluctuations irrégulières de la vitesse en deux instants successifs, l'intégrale du spectre de la turbulence, ainsi que la vitesse d'un écoulement turbulent comme variable aléatoire. Au-delà de ces difficultés, il nous semble nécessaire de mettre l'accent sur les aspects culturels et épistémologiques qui entrent en jeu dans cette histoire, et sur des tensions et rapprochements qui se manifestent durant la première moitié du XX^e^ siècle : l'existence de communautés différentes sur plusieurs échelles – locale, nationale et internationale –, l'écriture de théories reconnues encore aujourd'hui alors que d'autres ont disparu, le rôle de l'outillage scientifique d'un laboratoire dans l'applicabilité d'une théorie, ainsi que l'existence de collaborations entre profils scientifiques différents. Enfin, les interactions entre théorie et expérimentation d'un point de vue éducatif font l'objet d'une problématique déjà présente dans le passé, même si exprimée sous des formes différentes, ce qui soulève des questions sur son impact sur les pratiques enseignantes du siècle précèdent et d'aujourd'hui.

Références bibliographiques

Battimelli Giovanni, 1986. « On the History of the Statistical Theory of Turbulence », *Revista Mexicana de Física (Suplemento)*, 32 (S1), p. 3-48.

Bodenschatz Eberhard & Eckert Michael, 2011. « Prandtl and the Göttingen School », *in* P. A. Davidson, Y. Kaneda, K. Moffatt & K. R. Sreenivasan (eds), *A Voyage Through Turbulence*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 40-100.

Charru François, 2021. *Ailes, Nuages et Tourbillons. La mécanique des fluides en France de 1900 à 1950. Une politique* nationale, Cham, Birkhaüser.

Crastes Clément, 2019. *Les enseignants du supérieur et l'écoulement interne d'un fluide : modélisation et contextualisation dans différentes disciplines et filières de formation en France et aux États-Unis,* thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines, Orsay, Université Paris-Saclay.

Darrigol Olivier, 2005. *Worlds of Flow: A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*, Oxford, Oxford University Press.

Demuro Antonietta, 2018. *La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL,* thèse de doctorat, sous la dir. de A. Barberousse & R. Tazzioli, Université de Lille, https://theses.hal.science/tel-02093155 (consulté le 16/04/2024).

Demuro Antonietta, 2020. « Mathématiques et mathématiciens dans les activités de l'IMFL liées à l'aéronautique = (1929-1945) », *Nacelles. Passé et présent de l'aéronautique et du spatial*, 8, http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/978 (consulté le 16/04/2024).

Eckert Michael, 2006. *The Dawn of Fluid Dynamics: A Discipline Between Science and Technology,* Weinheim, Wiley-VCH.

Farge Marie, 1992. « Évolution des théories sur la turbulence développée », *in* A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert & K. Chemla (eds), *Chaos et déterminisme*, Paris, Éditions du Seuil (Points Sciences 80).

Kármán Theodore von, 1931. *Mechanical Similitude and Turbulence*, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) Technical Memorandum, 611.

Prandtl Ludwig, 1927. *Turbulent Flow*, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) Technical Memorandum, 435.

Roy Sophie, 2012. *125 ans à l'ombre de la tour Eiffel : du bureau central météorologique à Météo France*, Paris, Météo-France.

Sreenivasan Katepalli R., 2011. « G.I. Taylor: The Inspiration Behind the Cambridge School », *in* P. A. Davidson, Y. Kaneda, K. Moffatt & K. R. Sreenivasan (eds), *A Voyage Through Turbulence*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 127-186.

Taylor Geoffrey Ingram, 1922. « Diffusion by Continuous Movements », *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-20 (1), p. 196-212, https://doi.org/10.1112/plms/s2-20.1.196.

Taylor Geoffrey Ingram, 1935. « Statistical Theory of Turbulence », *Proceedings of the Royal Society A,* 151 (873), p. 421-444, https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0158.

Taylor Geoffrey Ingram, 1938. « The Spectrum of Turbulence », *Proceedings of the Royal Society A*, 164 (919), p. 476-490, https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032.

Postface

Pourquoi et comment introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique ? Une tentative de mise en perspective des contributions de l'ouvrage

Manuel Bächtold

Ce chapitre propose une mise en perspective des contributions de l'ouvrage. Deux objectifs d'apprentissage majeurs liés à l'introduction de l'histoire des sciences en classe sont distingués : l'acquisition de connaissances scientifiques et le développement de représentations riches et critiques des sciences. Les enjeux éducatifs sous-jacents à ces objectifs sont également identifiés : la préparation aux métiers scientifiques et la formation de futurs citoyens. Il est pointé que l'intégration de ces objectifs dans les programmes scolaires est relativement récente et qu'elle remplace une approche antérieure de l'histoire des sciences qui servait à transmettre des valeurs morales en réifiant la vérité. La mise en perspective met en lumière le fait que les objectifs d'apprentissage peuvent donner lieu à des stratégies d'enseignement en partie opposées : soit épurer l'histoire des sciences de certains détails pour favoriser l'acquisition de connaissances scientifiques, soit l'enrichir en mettant l'accent sur certaines étapes pour développer les représentations des sciences. Ce chapitre termine par une discussion sur les aspects épistémologiques qui peuvent ou méritent d'être étudiés en classe à partir de l'histoire des sciences.

Mots-clés : histoire des sciences, didactique des sciences, enseignement scientifique, épistémologie

Le projet qui réunit les contributions du présent ouvrage est celui de promouvoir la recherche concernant l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique, et ce en croisant les regards de chercheurs en didactique des sciences avec ceux d'historiens des sciences. Les

deux principales questions qui sous-tendent cette réflexion collective sont les suivantes : *pourquoi* et *comment* introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique ? La question du « pourquoi » renvoie aux objectifs d'apprentissage et plus largement aux enjeux éducatifs pouvant être assignés à ce recours à l'histoire des sciences dans le contexte particulier de la classe de sciences. La question du « comment » renvoie quant à elle à la méthode qu'il convient de privilégier pour introduire l'histoire des sciences en classe, c'est-à-dire à la stratégie d'enseignement, mais aussi aux moyens à mettre en œuvre et aux ressources à mobiliser. Derrière la stratégie d'enseignement se cachent également les deux questions suivantes : quelle histoire des sciences introduire en classe et quels aspects épistémologiques du fonctionnement des sciences y aborder ? Le présent chapitre propose une tentative de mise en perspective des contributions de l'ouvrage au prisme de ces différentes questions et de la littérature de recherche relevant de la *Nature of Science* (*NoS*) dans le champ de la didactique des sciences.

Pourquoi introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique ?

L'histoire des sciences est un domaine à la fois très vaste et complexe à appréhender. L'introduire dans l'enseignement, à l'école ou à l'université, n'a rien d'évident. Les enseignants doivent être formés pour cela et, en amont, les chercheurs doivent mener des travaux historiques, épistémologiques et didactiques pour développer des stratégies d'enseignement efficaces et constituer des ressources pertinentes pour les enseignants et leurs élèves. Qu'est-ce qui justifie un tel investissement ? Pour quels objectifs d'apprentissage l'histoire des sciences peut-elle constituer une plus-value ? Deux principales réponses sont apportées par les auteurs des chapitres de cet ouvrage : (A) favoriser l'acquisition par les élèves de connaissances scientifiques et (B) enrichir leurs représentations des sciences.

Le premier objectif se trouve au cœur des réflexions et de l'étude présentées dans le chapitre de Cécile de Hosson qui en parle en termes d'« apprentissage conceptuel ». Les exemples de contenus conceptuels considérés sont, d'une part, ceux de la mécanique et de la notion de force et, d'autre part, ceux de vision et de lumière. Au regard de cet objectif,

l'intérêt de l'histoire des sciences est de mieux comprendre les difficultés conceptuelles que peuvent rencontrer les élèves, mais aussi d'envisager les étapes par lesquelles ils peuvent passer, sur le plan conceptuel, afin de surmonter ces difficultés et s'approprier les connaissances scientifiques visées. Des parallèles entre l'évolution des idées dans l'histoire des sciences et celle des idées des élèves peuvent être opérés pour « fournir des pistes susceptibles de façonner un parcours d'apprentissage » ou, autrement dit, pour imaginer un « cheminement cognitif des élèves ». Considérant l'exemple de la mécanique des fluides, Clément Crastes met lui aussi en avant les éclairages que l'histoire des sciences peut apporter sur les difficultés des élèves sur le plan conceptuel et les séquences d'enseignement qu'elle permet ainsi de penser : « recourir à l'histoire des sciences peut être l'occasion d'étudier les conceptions de scientifiques d'autrefois et leur évolution au sein d'une communauté de recherche, d'y déceler des pistes permettant d'émettre des hypothèses sur les difficultés des élèves, d'élaborer des dispositifs d'enseignement adaptés, en ravivant le questionnement scientifique ».

À ce sujet, on peut distinguer deux usages distincts de l'histoire des sciences : celui des chercheurs, en amont de la classe, afin de mieux comprendre les étapes possibles d'apprentissage des élèves, et celui des enseignants et des élèves, en classe, pour étudier, manipuler et/ou discuter des idées formulées par des scientifiques dans le passé. Le premier usage n'implique pas nécessairement le second. L'histoire des sciences peut être utilisée à des fins de meilleure compréhension de la pensée des élèves, sans qu'il soit besoin d'aborder avec eux cette histoire des sciences.

Concernant ce premier usage de l'histoire des sciences, Cécile de Hosson nous met en garde. Opérer des analogies entre l'évolution de la pensée des scientifiques dans l'histoire et celle de la pensée des élèves aujourd'hui peut certes se révéler « heuristique ». En l'occurrence, cela lui a permis d'identifier une difficulté liée à la conceptualisation de la vision (le phénomène d'éblouissement que peut produire la lumière lorsqu'elle pénètre dans l'œil) et de proposer une stratégie pour la surmonter. Cependant, ces analogies présentent plusieurs limites qui invitent à la prudence. Si les élèves font appel à des notions qui en évoquent des anciennes, comme celle de l'*impetus* (une forme d'élan transmise à un objet et

contenue en lui temporairement), ils ne les appliquent généralement pas de façon systématique et rigoureuse comme les scientifiques par le passé. C'est un point que Rosalind Driver, Edith Guesne et Andrée Tiberghien (dir., 1985) ont également remarqué : les similitudes entre les conceptions des élèves et celles des scientifiques dans l'histoire sont limitées, dans la mesure où les premières sont souvent beaucoup moins cohérentes que les secondes. D'après Colin Gauld (1991), cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les élèves manipulent les notions en question sans en avoir conscience, contrairement aux scientifiques qui les appliquent de façon consciente, rationnelle et contrôlée. Négliger ces limites peut conduire à l'idée d'une évolution unique et nécessaire de la pensée, celle suivie par les scientifiques dans le passé et celle que devraient donc aussi suivre les élèves en classe. Cette vision rigide, critiquée par Cécile de Hosson, est également évoquée par Pierre Savaton dans son exploration de l'histoire de l'enseignement scientifique. Elle se trouve notamment exprimée par Henri Poincaré en 1908 qui écrit : « L'éducateur doit faire repasser l'enfant par où ont passé ses pères ; plus rapidement mais sans brûler d'étape. À ce compte, l'histoire de la science doit être notre premier guide » (Poincaré, [1908] 1920 : 135 ; citation tirée de la contribution de Pierre Savaton). Les recherches empiriques récentes sur les *learning progressions* montrent certes des tendances chez les élèves à maîtriser les différents aspects d'un concept de base des sciences (comme la matière, l'énergie ou l'évolution biologique) selon certaines étapes, mais il ne s'agit que de tendances et les cheminements cognitifs des élèves sont nombreux et complexes (Jin *et al.*, 2019). Postuler l'existence d'une évolution unique de la pensée, c'est ignorer ce pluralisme des modes de pensée des élèves et risquer d'appauvrir les stratégies d'enseignement pouvant être développées et testées.

Le second objectif assigné à l'introduction de l'histoire des sciences en classe, celui d'enrichir les représentations des sciences des élèves, motive les études présentées par Laurence Maurines et Christian Bracco. Au point de départ de ces études se trouve un constat, qui a été documenté par de nombreuses recherches antérieures : les élèves et les étudiants, mais aussi leurs enseignants, partagent des représentations des sciences qui sont généralement naïves, voire « incohérentes », suivant l'expression de Laurence Maurines, ou formant une « mosaïque », suivant celle de Clément Crastes.

Ces représentations peuvent être qualifiées de naïves au sens où elles réduisent la complexité des rapports entre théorie et expérience à des schémas simplistes (par exemple, l'expérience précède la théorie ou une expérience suffit à vérifier une théorie) et ignorent la richesse des pratiques effectives des scientifiques (par exemple, le rôle de la modélisation ou de l'argumentation). Cette richesse des pratiques scientifiques a notamment été mise en lumière par les travaux des philosophes des sciences depuis les années 1970 contribuant à ce qui est appelé le « tournant pratique » (Soler *et al.*, 2014). La question de l'« incohérence » des représentations des élèves ou des enseignants est peut-être plus complexe à décrire et à évaluer. Les représentations des sciences des élèves ou des enseignants peuvent apparaître « incohérentes » aux yeux des chercheurs lorsque ceux-ci les évaluent globalement, suivant un critère de cohérence épistémologique. En ce sens, comme l'observe Maria Teresa Guerra-Ramos (2012), les enseignants ont généralement des points de vue éclectiques qui ne peuvent être rapprochés d'une position épistémologique unique. Cependant, il est raisonnable d'admettre que tout individu a une cohérence dans ses représentations qui est relative aux situations dans lesquelles il est impliqué. La cohérence des enseignants pourrait ainsi être trouvée non pas dans leurs représentations des sciences prises isolément, mais dans celles des sciences associées à leurs pratiques d'enseignement et, corrélativement, à d'autres types de connaissances requises pour l'enseignement, qu'elles soient disciplinaires, pédagogiques ou didactiques (Bächtold, Cross & Munier, 2021 ; Waters-Adams, 2006). On pourrait ainsi expliquer le fait qu'un enseignant reconnaisse à l'héliocentrisme, mais non à l'atome, le statut de modèle pouvant évoluer. Sans une formation leur offrant des opportunités de discuter sur le plan épistémologique différents aspects du fonctionnement des sciences, les enseignants peuvent très bien se satisfaire de cohérences relatives à des situations particulières et ne pas ressentir le besoin de se forger des représentations des sciences avec une cohérence globale. *A fortiori*, on peut penser qu'il en va de même pour leurs élèves.

Partant de ce constat, Laurence Maurines et Christian Bracco proposent des stratégies d'enseignement dont l'objectif est de permettre aux élèves et aux étudiants de développer des représentations plus « riches » et plus « authentiques » des sciences (suivant les termes de Laurence Maurines), et

en particulier de « mieux cerner le caractère évolutif de la pensée scientifique » (suivant l'objectif plus ciblé de Christian Bracco). Dans les contributions de Clément Crastes et de Cécile de Hosson, cet objectif est également affiché, bien que de façon secondaire par rapport à celui de favoriser l'acquisition, par les élèves, de connaissances scientifiques. Clément Crastes écrit ainsi que : « Introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement peut être aussi l'occasion de développer la réflexion des élèves sur la nature des savoirs scientifiques et de leurs modes d'élaboration, et plus largement sur la *NoS* ». Cécile de Hosson, dans la dernière partie de son chapitre, évoque les « objectifs d'apprentissage […] relatifs à la Nature de la Science » pouvant être associés à la stratégie d'enseignement qu'elle propose, et plus précisément une « sensibilisation des élèves, des étudiant·es à ce qui fonde l'entreprise humaine et socio-culturelle de la science, à la nature des sciences ».

L'exploration historique des programmes d'enseignement scientifique menée par Pierre Savaton et présentée dans son chapitre semble indiquer que les deux objectifs A et B considérés ci-dessus n'apparaissent que tardivement dans les programmes, dans les années 2000, et met au jour d'autres objectifs qui ont été associés par le passé à l'usage de l'histoire des sciences en classe. Les objectifs A et B sont ainsi formulés en 2004 dans les programmes de sciences de la vie et de la Terre (SVT) des classes de sixième :

> [l'histoire des sciences] permet de […] faire réfléchir [les élèves] sur la façon dont se construisent les savoirs, de manière rarement linéaire et progressive mais par tâtonnements, par remise en cause de théories incomplètes ou erronées. C'est également une façon de prendre en considération les représentations et obstacles qui existent à chaque étape des apprentissages[1].

Antérieurement, au cours des XIX^e^ et XX^e^ siècles, l'épistémologie qui transparaît dans les programmes et les discours des acteurs politiques et scientifiques préoccupés par l'enseignement contraste avec l'épistémologie contemporaine. Les sciences y sont souvent présentées comme le fruit d'« hommes illustres » (pour reprendre l'expression de Jean-Baptiste Dumas [*in Fortoul*, 1854 : 412] ; citation tirée de la contribution de Pierre

[1] *Bulletin Officiel* (BO) Hors-série n° 5, 9 septembre 2004, p. 20.

Savaton) qui se sont distingués par leurs efforts et surtout la rigueur de leur esprit en quête de la vérité. La citation de Victor Duruy en 1864 permet d'exemplifier cette vision des sciences : « Par les sciences, […] nous plions l'esprit à la discipline sévère des méthodes de raisonnement, et nous montrons par quelle voie austère et rude il faut aller chercher la vérité » (Duruy, cité par Belhoste éd., 1992 : 389 ; citation tirée de la contribution de Pierre Savaton). Les termes « esprit » et « vérité » sont récurrents dans les citations données par Pierre Savaton. Ils se traduisent par l'objectif d'apprentissage qui semble avoir prévalu dans les programmes et les discours du passé : former l'esprit des élèves avec pour modèle l'esprit des scientifiques, en présupposant que celui-ci est imprégné de valeurs morales et en particulier de la valeur associée à une certaine notion de vérité. Cette notion de vérité est érigée en idéal qu'il faut poursuivre et qui doit permettre de lutter contre « l'ignorance ou le fanatisme » (suivant les termes de Louis Mangin [1905 : 33] ; citation tirée de la contribution de Pierre Savaton). Tacitement, dans ces textes et discours, la vérité est réifiée et considérée comme une mesure accessible permettant d'évaluer les théories successives et d'identifier laquelle serait « juste » (qualificatif utilisé par Paul Tannery [1907] ; citation tirée de la contribution de Pierre Savaton). L'évolution des objectifs d'apprentissage associés à l'histoire des sciences vers ceux discutés plus haut (A et B) apparaît concomitante de celle du champ de l'épistémologie et d'une remise en question de cette conception de la vérité (notamment par l'argument de sous-détermination de la théorie par l'expérience[2]).

De façon plus ponctuelle, le développement de la pensée critique est évoqué par Clément Crastes comme un autre objectif d'apprentissage pouvant être associé à l'introduction de l'histoire des sciences en classe. Cet objectif se trouve aussi exprimé dans les programmes d'enseignement des sciences de 2019, cités par Pierre Savaton, dans lesquels il est question de « la formation de l'esprit critique »[3]. La manière dont cette pensée critique peut être développée grâce à l'histoire des sciences et la définition de ce qu'il faut entendre par « pensée critique » ne sont pas précisées dans les textes de ces deux auteurs. Une manière de comprendre

---

2 Voir : Psillos, 1999.

3 BO spécial n° 1, 22 janvier 2019, Programmes des lycées.

cette évocation de la pensée critique consiste à relier cette notion à celle de représentations *critiques* des sciences. À cet égard, l'histoire des sciences offre des opportunités de mener des « réflexions critiques sur ses conditions et contraintes [des sciences] », comme le pointent Dietmar Höttecke et Cibelle Celestino Silva (2011). Selon cette perspective privilégiée par Michael R. Matthews (2012), l'objectif d'apprentissage serait de développer les représentations des sciences des élèves, non pas en leur faisant *apprendre* des points d'épistémologie, mais en les amenant à *questionner et discuter*, sur le plan épistémologique, différents aspects du fonctionnement des sciences.

En arrière-plan des objectifs d'apprentissage visés par les chercheurs qui ont contribué au présent ouvrage, nous pouvons nous questionner sur les enjeux éducatifs. Quels sont-ils ? Se référant plus généralement à l'enseignement scientifique, Laurence Maurines distingue deux enjeux éducatifs : préparer les élèves qui s'orienteraient « vers les métiers scientifiques » et faire acquérir à tous les élèves, en tant que futurs « citoyens », une « culture scientifique ». Elle précise que « cette culture est pensée comme devant reposer sur des connaissances, non seulement en sciences, mais aussi sur ce que sont les sciences/la science, ainsi que sur la capacité à les utiliser pour penser ou agir de manière responsable dans des contextes variés ». Les deux premiers éléments de la culture scientifique renvoient respectivement aux objectifs A et B. Autrement dit, l'acquisition d'une culture scientifique implique l'acquisition de connaissances scientifiques et de représentations riches des sciences.

Les résultats de cet examen des objectifs d'apprentissage et des enjeux éducatifs que les contributeurs de cet ouvrage associent à l'introduction de l'histoire des sciences en classe sont résumés dans la figure 1. Dans cette dernière, nous proposons d'inclure une flèche à deux têtes représentant un lien entre les deux objectifs A et B. En effet, certaines analyses des données de l'enquête PISA[4] de 2015 ont mis en évidence des corrélations importantes entre les représentations des sciences des élèves et leur maîtrise des connaissances scientifiques (She, Lin & Huang, 2019). Ces corrélations peuvent possiblement s'expliquer par une relation

[4] Programme international pour le suivi des acquis des élèves.

d'influence mutuelle. On peut penser qu'une meilleure compréhension du statut des connaissances scientifiques et de la manière dont elles sont construites permet une meilleure compréhension de leur signification et donc une meilleure appropriation de celles-ci. Inversement, on peut supposer qu'une meilleure maîtrise des connaissances scientifiques offre une meilleure base pour mener une réflexion sur leur statut et le processus de leur construction.

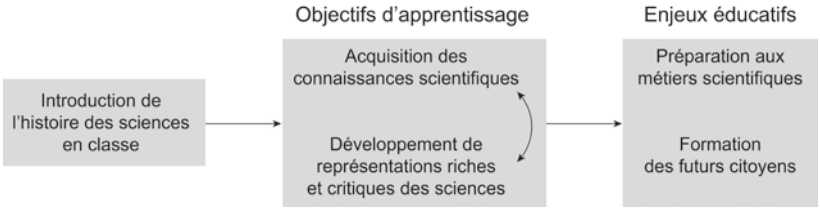


Figure 1 – Objectifs d'apprentissage et enjeux éducatifs pouvant être associés à l'introduction de l'histoire des sciences en classe

Source : Réalisation de l'auteur.

Comment introduire l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique ?

Les travaux publiés en histoire des sciences peuvent être à la fois très détaillés et pointus. Ils peuvent couvrir des temporalités très grandes et des champs disciplinaires variés. De plus, les réflexions qu'ils permettent de développer sur le plan épistémologique peuvent être particulièrement complexes. Cela pose donc la question de la manière dont l'histoire des sciences peut être introduite en classe et rendue accessible aux élèves. Quelle histoire des sciences ? Sous quelle forme ? Les réponses apportées par les auteurs des chapitres précédents sont diverses. Elles apparaissent en partie dépendantes des objectifs d'apprentissage visés.

Avec pour objectif de faire acquérir aux élèves des connaissances scientifiques, l'approche développée par Cécile de Hosson repose sur une « reconstruction didactique » de l'histoire des sciences. Cette reconstruction correspond à la combinaison d'éléments relevant de l'histoire

des sciences et d'éléments relevant de la didactique des sciences. Plus précisément, il s'agit de faire converger un « travail de sélection et d'organisation d'éléments historiques » avec une analyse épistémologique des savoirs à enseigner et un examen des difficultés des élèves. Le travail de reconstruction conduit à la constitution de ressources pédagogiques (par exemple, sur le mécanisme de la vision) qui puisent dans des sources primaires d'histoire des sciences et qui s'autorisent à réorganiser les contenus en fonction d'une visée didactique, celle de permettre aux élèves de suivre un cheminement cognitif fécond pour l'appropriation des connaissances scientifiques. La reconstruction didactique d'un épisode historique donné peut alors différer du récit de référence des chercheurs en histoire des sciences. Cécile de Hosson soutient que ce choix est légitime du point de vue didactique. En outre, elle fait remarquer que tout récit historique correspond à une reconstruction du passé et implique des choix en termes de sélection et d'organisation du matériau historique. Concernant le processus de sélection de ce dernier, son approche rejoint celle d'autres chercheurs en didactique des sciences qui estiment qu'il est justifié de négliger certains détails expérimentaux et mathématiques lorsqu'il s'agit d'introduire l'histoire des sciences dans la classe et de la rendre accessible aux élèves (De Berg, 1997).

Cette approche contraste avec celle privilégiée par Christian Bracco, qui, au lieu de mettre de côté des détails historiques, propose au contraire de réintégrer des éléments historiques oubliés par l'enseignement. Les éléments historiques en question sont d'ordre conceptuel. Ils correspondent à des « étapes intermédiaires » dans l'évolution des théories. Ces étapes se situent entre des périodes relativement stables, marquées par des théories constitutives de paradigmes au sens de Thomas Kuhn. Elles se voient en général « ignorées » dans l'enseignement, car perçues comme des « "solutions approchées", éphémères et donc indignes d'être enseignées ». Il en va ainsi par exemple du modèle héliocentrique « transitoire » développé par Johannes Kepler basé sur l'« équant ». Dans le contexte de l'enseignement, Christian Bracco s'inscrit en faux, contre l'approche d'inspiration kuhnienne qui présente l'histoire des sciences en termes de « ruptures ». D'après lui, cette idée de rupture résulte de l'ignorance des étapes scientifiques intermédiaires, lesquelles impliquent

une forme de « continuisme ». Sur le plan conceptuel, ces étapes permettent de faire « dialoguer » des théories habituellement « présentées de manière cloisonnée », de jeter des « ponts » entre elles ou, autrement dit, de comprendre de quelle manière précisément une ancienne théorie a progressivement été révisée ou remplacée par une nouvelle. Dès lors, intégrer les étapes intermédiaires dans l'enseignement est un moyen de mieux donner à voir aux élèves ou aux étudiants l'évolution des théories. Pour Christian Bracco, ce qui est en jeu sur le plan des apprentissages, c'est le développement de représentations fines des sciences concernant leur caractère évolutif.

Guidées par des objectifs d'apprentissage différents, les deux approches présentées ci-dessus semblent impliquer des stratégies antagonistes. Dans le premier cas, l'objectif A (l'acquisition de connaissances scientifiques) conduit à introduire en classe une histoire des sciences épurée de détails inutiles pour la construction d'un parcours cognitif vers les connaissances scientifiques. Dans le second cas, l'objectif B (le développement des représentations des sciences) justifie au contraire l'introduction en classe de détails habituellement écartés pour la restitution très précise d'une continuité dans l'évolution des théories.

Motivée également par l'objectif B, Laurence Maurines présente toutefois une approche qui diffère des deux précédentes. Son hypothèse de départ est la suivante : « pour comprendre la façon dont les scientifiques génèrent des connaissances par leur activité, une pluralité de points de vue est nécessaire ». Cette idée de pluralité des points de vue implique le recours en classe à une multiplicité de sources ou, en d'autres termes, à une multiplicité d'informations historiques. Pour surmonter l'écueil d'une surcharge cognitive et d'une démobilisation des élèves, la stratégie proposée consiste à « répartir l'information historique sur l'ensemble des documents » et à ne transmettre ainsi à chaque élève qu'un point de vue ou un nombre limité de points de vue. L'ensemble des informations peut ainsi être traité de façon coopérative et donner lieu à mise en commun lors de laquelle les points de vue multiples sont discutés et des éléments d'épistémologie sont « institutionnalisés ». Cette approche est également adoptée par Clément Crastes qui s'y réfère en parlant d'« investigations documentaires à caractère historique ». Il est a noté

que Laurence Maurines, à la différence de Cécile de Hosson, privilégie l'usage de sources secondaires d'histoire des sciences, ce qui est présenté comme un moyen supplémentaire de rendre l'histoire des sciences accessible aux élèves.

Par ailleurs, Laurence Maurines souligne que son approche « relève d'un enseignement explicite de la *NoS* », au sens où le fonctionnement des sciences n'est pas simplement donné à voir aux élèves par l'étude de documents comportant des informations historiques. Selon cette approche, le fonctionnement des sciences doit être questionné et discuté, autrement dit traité de façon explicite. Cette approche explicite diffère d'une approche implicite selon laquelle il suffit de montrer le fonctionnement des sciences aux élèves ou de leur faire vivre des activités scientifiques pour qu'ils fassent évoluer leurs représentations des sciences. La supériorité de l'approche explicite sur l'approche implicite en termes d'efficacité a été mise en évidence par plusieurs études dans les années 2000 et 2010 (Khishfe, 2023). Ce résultat très important concernant le développement des représentations des sciences des élèves vaut pour les trois principales stratégies qui ont été développées et évaluées par la recherche : introduire l'histoire des sciences en classe, faire vivre aux élèves des démarches scientifiques et leur faire étudier des questions socio-scientifiques (Khishfe, 2023).

Concernant toujours l'objectif B, une question supplémentaire mérite d'être abordée : quels aspects épistémologiques du fonctionnement des sciences est-il pertinent d'aborder sur la base de l'histoire des sciences ? Les contributions de Clément Crastes et d'Antonietta Demuro mettent toutes deux en exergue un aspect épistémologique : le rapport entre théorie et expérience ou, plus précisément, le rôle que joue l'expérience dans la construction des théories et des modèles. Étudiant l'histoire des modèles de l'écoulement incompressible, Clément Crastes met en lumière les relations non univoques entre un modèle (en l'occurrence, un modèle décrivant la perte de charge dans un tuyau horizontal par une équation linéaire) et l'expérience : les prévisions du modèle peuvent être corroborées par une partie des observations et remises en cause par d'autres, ce qui pointe vers les limites du modèle. Explorant également l'histoire de la mécanique des fluides et en particulier les phénomènes de turbulence, Antonietta Demuro

décrit les liens complexes qu'entretiennent la théorie et l'expérience. Elle montre comment les données de l'expérience permettent de compléter les modèles par des constantes empiriques, ce qui renvoie à un rôle particulier de l'expérience qui a été souligné par Bas C. van Fraassen (2008), à savoir celui de « remplir un vide » dans une théorie afin de la rendre « empiriquement adéquate ». Elle montre également comment la complexité des phénomènes observés peut pousser les scientifiques à raffiner leur modèle sur le plan mathématique en intégrant des considérations statistiques. Ces éléments historiques et épistémologiques relativement techniques sont considérés par Antonietta Demuro comme pouvant alimenter la réflexion épistémologique des enseignants, plutôt que des étudiants.

Laurence Maurines, quant à elle, décrit comment l'exemple des modèles géocentriques et héliocentriques permet de questionner le statut des observations dans la construction des connaissances scientifiques. La séquence d'enseignement implémentée et étudiée montre que celle-ci peut conduire certains élèves à remettre en question la vision naïve de la primauté des observations sur la théorie, à prendre conscience de l'existence de valeurs et de la charge théorique des observations, ce qui correspond à un élément d'épistémologie mis en évidence par Norwood Russell Hanson ([1958] 2000).

Comme évoqué plus haut, Christian Bracco, pour sa part, centre son étude sur le caractère évolutif des théories. C'est un aspect des sciences que Norm G. Lederman et ses collègues (2002) estiment important à traiter en classe avec les élèves au regard du « mythe » largement partagé selon lequel les « lois scientifiques et d'autres idées [en sciences] sont absolues » (McComas, 1998). Faire prendre conscience aux élèves du caractère évolutif des sciences est un objectif qui a été explicitement introduit dans les programmes français, en particulier ceux de SVT de 2005, comme l'illustre la citation donnée plus haut issue du chapitre de Pierre Savaton. Cette citation parle de « tâtonnements » et de « remise en cause de théories incomplètes ou erronées ». On peut remarquer que ces notions de tâtonnement et de théorie erronée étaient déjà présentes dans les programmes et les discours antérieurs sur l'enseignement restitués par Pierre Savaton : par exemple, Léon Bourgeois parle en 1890 de « tâtonnements successifs » (Bourgeois, cité par Belhoste éd., 1992 :

525) et Paul Tannery évoque en 1907 les « erreurs » de l'esprit humain dans la recherche de la « vérité ». Ces textes anciens et récents mettent au jour une certaine représentation des sciences associée à l'idée du caractère évolutif des théories. Selon cette représentation, les théories qui se sont succédé dans l'histoire sont toutes erronées, mais constituent des étapes permettant aux scientifiques d'accéder à terme aux théories justes identifiables à la vérité. Il s'agit d'une conception finaliste de l'évolution des théories qui contraste avec l'idée défendue actuellement par nombre d'épistémologues selon laquelle toutes les théories acceptées aujourd'hui restent faillibles en principe, au sens où elles sont susceptibles d'être révisées dans le futur, voire remplacées par de nouvelles. Par conséquent, on pourrait distinguer trois représentations des sciences sur cette question : les théories sont absolues ; les théories évoluent vers la vérité ; les théories évoluent et restent toujours faillibles. Ces considérations invitent à la prudence concernant l'objectif d'apprentissage qui consiste à faire prendre conscience aux élèves du caractère évolutif des sciences. Suivant la critique de Matthews évoquée plus haut, on peut questionner la pertinence de vouloir faire *apprendre* aux élèves que les théories évoluent, dans la mesure où cette idée d'évolution peut être entendue de différentes manières. Si l'objectif est de conduire les élèves vers des représentations critiques des sciences, il semble plus fécond de présenter aux élèves des exemples historiques d'évolution de théories et de les inviter à discuter la question de ce que l'on peut en conclure sur le statut des théories passées, mais aussi des théories actuelles, tout en reconnaissant le caractère controversé d'une telle question. D'autres questions épistémologiques controversées sont susceptibles d'être discutées avec profit en classe, telles que la question du statut des modèles, qui oppose des points de vue réalistes et instrumentalistes, ou la question du type d'influence que le contexte socio-économique et culturel exerce sur la construction de la connaissance scientifique (Bächtold, Cross & Munier, 2021).

Enfin, les études de Clément Crastes, d'Antonietta Demuro et de Laurence Maurines suggèrent toutes trois que l'histoire des sciences offre l'opportunité d'explorer et de questionner les liens entre sciences et société. Considérant l'histoire de la mécanique des fluides, Clément Crastes illustre « l'interdépendance entre sciences et société », en soulignant qu'au

XVIII^e siècle, l'étude des marées et des alizés était en partie motivée par des enjeux économiques liés au transport maritime. Se penchant sur l'histoire de la mécanique des fluides au XX^e siècle, Antonietta Demuro met en évidence l'intérêt des recherches sur les phénomènes de turbulence pour le développement de l'industrie aéronautique. Elle montre aussi comment cette industrie fournit des situations concrètes à étudier (des avions soumis à des turbulences), mais aussi des moyens expérimentaux pour tester des modèles et recueillir des données (en mettant par exemple des soufleries à disposition des chercheurs). Pour Laurence Maurines, le cas de l'histoire du géocentrisme et de l'héliocentrisme permet également de « rendre compte de [l']inscription [des sciences] dans une communauté et une société », ce qui renvoie à deux points qui méritent d'être distingués. Le terme « société » renvoie ici à la question des liens entre la sphère scientifique et la sphère sociétale, cette dernière étant porteuse de valeurs et de croyances (par exemple, des croyances métaphysiques ou religieuses) qui peuvent influencer les recherches scientifiques. Le terme « communauté » se réfère quant à lui à la sphère scientifique en tant que telle, laquelle implique un ensemble de chercheurs qui s'engagent collectivement dans des pratiques scientifiques, celles-ci pouvant être décrites comme des pratiques sociales (telles que l'argumentation, pour reprendre l'exemple donné par Laurence Maurines) caractérisées par certaines normes (Kuhn *et al.*, 2013 ; Nussbaum, 2021).

Conclusion

Cette mise en perspective des contributions de l'ouvrage réduit inévitablement leur richesse et laisse dans l'ombre de nombreuses questions qui mériteraient une discussion approfondie. Toutefois, elle a permis de distinguer deux principaux objectifs d'apprentissage associés à l'introduction de l'histoire des sciences en classe (l'acquisition des connaissances scientifiques et le développement de représentations riches et critiques des sciences), ainsi que des enjeux éducatifs qui se situent en arrière-plan de ces objectifs (la préparation aux métiers scientifiques et la formation des futurs citoyens). L'exploration de l'histoire de l'enseignement scientifique met en évidence que l'intégration de ces objectifs d'apprentissage dans les programmes est relativement récente et prend le relais d'une instrumentalisation de l'histoire des

sciences au service d'une transmission de valeurs morales réifiant la vérité. Cette mise en perspective a également montré que les objectifs d'apprentissage peuvent aboutir à des stratégies d'enseignement qui se révèlent, dans une certaine mesure, antagonistes : introduire l'histoire des sciences en l'épurant de certains détails pour favoriser l'acquisition par les élèves de connaissances scientifiques ou, au contraire, en l'enrichissant de certaines étapes pour développer leurs représentations des sciences. Enfin, cette mise en perspective a permis de soulever la question des aspects des sciences pouvant être étudiés à partir de l'histoire des sciences et de mettre en avant l'intérêt de traiter avec les élèves des questions épistémologiques controversées.

Références bibliographiques

Bächtold Manuel, Cross David & Munier Valérie, 2021. « How to Assess and Categorize Teachers' Views of Science? Two Methodological Issues », *Research in Science Education*, 51 (5), p. 1423-1435, https://doi.org/10.1007/s11165-019-09904-x.

Belhoste Bruno (éd.), 1992. *Les sciences dans l'enseignement secondaire français. Tome I^er^ : 1789-1914. Textes officiels*, Paris, Institut national de recherche pédagogique/Éditions Economica.

De Berg Kevin C., 1997. « The Development of the Concept of Work: A Case Study Where History Can Inform Pedagogy », *Science & Education*, 6 (5), p. 511-527, https://doi.org/10.1023/A:1008642713225.

Driver Rosalind, Guesne Edith & Tiberghien Andrée (dir.), 1985. *Children's Ideas in Science*, Milton Keynes, Open University Press.

Fortoul Hippolyte, 1854. « Instruction générale sur l'exécution du plan d'études des lycées », *Bulletin administratif de l'instruction publique*, 5 (59), p. 339-461, education.persee.fr/doc/baip_1254-0714_1854_num_5_59_1141 (consulté le 28/02/2023).

Gauld Colin, 1991. « History of Science, Individual Development and Science Teaching », *Research in Science Education*, 21 (1), p. 133-140, https://doi.org/10.1007/BF02360466.

Guerra-Ramos Maria Teresa, 2012. « Teachers' Ideas About the Nature of Science: A Critical Analysis of Research Approaches and Their Contribution

to Pedagogical Practice », *Science & Education*, 21 (5), p. 631-655, https://doi.org/10.1007/s11191-011-9395-7.

Hanson Norwood Russell, [1958] 2001. *Modèles de la découverte. Une enquête sur les fondements conceptuels de la science*, Chennevières-sur-Marne, Dianoïa.

Höttecke Dietmar & Silva Cibelle Celestino, 2011. « Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge: An Analysis of Obstacles », *Science & Education*, 20 (3-4), p. 293-316, https://doi.org/10.1007/s11191-010-9285-4.

Jin Hui, Mikeska Jamie N., Hokayem Hayat & Mavronikolas Elia, 2019. « Toward Coherence in Curriculum, Instruction, and Assessment: A Review of Learning Progression Literature », *Science Education*, 103 (5), p. 1206-1234, https://doi.org/10.1002/sce.21525.

Khishfe Rola, 2023. « Improving Students' Conceptions of Nature of Science: A review of the Literature », *Science & Education*, 32 (6), p. 1887-1931, https://doi.org/10.1007/s11191-022-00390-8.

Kuhn Deanna, Zillmer Nicole, Crowell Amanda & Zavala Julia, 2013. « Developing Norms of Argumentation: Metacognitive, Epistemological, and Social Dimensions of Developing Argumentive Competence », *Cognition and Instruction*, 31 (4), p. 456-496, https://doi.org/10.1080/07370008.2013.830618.

Lederman Norm G., Abd-El-Khalick Fouad, Bell Randy L. & Schwartz Renée S., 2002. « Views of Nature of Science Questionnaire: Toward Valid and Meaningful Assessment of Learners' Conceptions of Nature of science », *Journal of Research in Science Teaching*, 39 (6), p. 497-521, https://doi.org/10.1002/tea.10034.

Mangin Louis, 1905. « L'enseignement des sciences naturelles dans le second cycle de l'enseignement secondaire », *in* F. Le Dantec, L. Mangin, F. Péchoutre, E. Caustier, P. Vidal de La Blache, L. Gallois & P. Dupuy, *L'enseignement des sciences naturelles et de la géographie. Conférences du Musée pédagogique*, Paris, Imprimerie nationale, p. 21-35.

Matthews Michael R., 2012. « Changing the Focus: From Nature of Science (NOS) to Features of Science (FOS) », *in* M. Khine (ed.), *Advances in Nature of Science Research: Concepts and Methodologies*, Dordrecht, Springer, p. 3-26.

McComas William F., 1998. « The Principal Elements of the Nature of Science: Dispelling the Myths », *in* W. F. McComas (ed), *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies*, Dordrecht, Kluwer Academic, p. 41-52.

Nussbaum E. Michael, 2021. « Critical Integrative Argumentation: Toward Complexity in Students' Thinking », *Educational Psychologist*, 56 (1), p. 1-17, https://doi.org/10.1080/00461520.2020.1845173.

Poincaré Henri, [1908] 1920. *Science et méthode*, Paris, Flammarion.

Psillos Stathis, 1999. *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, London, Routledge.

She Hsiao-Ching, Lin Huann-Shyang & Huang Li-Yu, 2019. « Reflections on and Implications of the Programme for International Student Assessment 2015 (PISA 2015) Performance of Students in Taiwan: The Role of Epistemic Beliefs About Science in Scientific Literacy », *Journal of Research in Science Teaching*, 56 (10), p. 1309-1340, https://doi.org/10.1002/tea.21553.

Soler Léna, Zwart Sjoerd, Lynch Michael & Israel-Jost Vincent (eds), 2014. *Science After the Practice Turn in the Philosophy, History, and Social Studies of Science*, New York, Routledge.

Tannery Paul, 1907. « Programme d'un cours d'histoire des sciences », *La Revue du mois*, 3 (16), p. 385-391.

Van Fraassen Bas C., 2008. *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford, Clarendon Press.

Waters-Adams Stephen, 2006. « The Relationship Between Understanding of the Nature of Science and Practice: The Influence of Teachers' Beliefs About Education, Teaching and Learning », *International Journal of Science Education*, 28 (8), p. 919-944, https://doi.org/10.1080/09500690500498351.

Auteur·es

Bächtold, Manuel

Laboratoire interdisciplinaire de recherche en didactique, éducation et formation (LIRDEF), Université de Montpellier et Université Paul Valéry Montpellier

Maître de conférences HDR en sciences de l'éducation

Thèmes de recherche : l'enseignement de l'énergie au lycée à la lumière de l'histoire et de la philosophie des sciences ; l'apprentissage de l'argumentation sur des questions socio-scientifiques et ses liens avec les croyances épistémiques des élèves ; l'enseignement des sciences par démarches d'investigation et ses effets sur l'apprentissage, la motivation et les croyances épistémiques des élèves ; les liens entre les croyances épistémiques, la motivation et l'approche de l'apprentissage des étudiants à l'université

Publications récentes : Manuel Bächtold, David Cross & Valérie Munier, « How to Assess and Categorize Teachers' Views of Science? Two Methodological Issues », *Research in Science Education*, 51 (5), 2019, p. 1423-1435, https://doi.org/10.1007/s11165-019-09904-x ; Manuel Bächtold, « Introducing Joule's Paddle Wheel Experiment in the Teaching of Energy: Why and How? », *Foundations of Science*, 26 (3), 2021, p. 791-805, https://doi.org/10.1007/s10699-020-09664-2 ; Manuel Bächtold, Gwen Pallarès, Kevin De Checchi & Valérie Munier, « Combining Debates and Reflective Activities to Develop Students' Argumentation on Socioscientific Issues », *Journal of Research in Science Teaching*, 60 (4), 2023, p. 761-806, https://doi.org/10.1002/tea.21816

manuel.bachtold@umontpellier.fr

Bracco, Christian

Inspé, académie de Nice ; Équipe « Histoire des sciences astronomiques », SYRTE (Système de Référence Temps-Espace), Observatoire de Paris – Université PSL, CNRS, Sorbonne Université

Maître de conférences HDR en histoire des sciences

Thèmes de recherche : histoire de la physique des XIX^e^ et XX^e^ siècles

Publications récentes : Christian Bracco & Jean-Pierre Provost, « First-order Relativity: From Fresnel's 1818 "Drag" Coefficient to Lorentz's 1895 "Local Time" followed by Poincaré's 1900 Interpretation, and Finally Up to Einstein's 1911-1912 Spatially Flat Metric », *Almagest. International Journal for the History of Scientific Ideas*, 13 (2), 2022, p. 96-111, https://doi.org/10.1484/J.ALMAGEST.5.132478 ; Christian Bracco, « Henri Poincaré : du "principe de mouvement relatif" au "principe de relativité" en passant par le "principe de réaction" et son rapport à la théorie de Lorentz », *Philosophia Scientiæ*, 27 (2), 2023, p. 35-62, https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.4080 ; Christian Bracco & Jean-Pierre Provost, *Henri Poincaré et la relativité : 1900, 1905, 1912. Trois moments de sa réflexion*, London, ISTE Éditions, 2023 ; Christian Bracco, *When Albert became Einstein (1895-1901)*, Les Ulis, EDP Sciences, 2024

Christian.Bracco@univ-cotedazur.fr ; Christian.Bracco@obspm.fr

Crastes, Clément

Études sur les sciences et techniques (EST ; équipe DidaScO), Université Paris-Saclay

Enseignant agrégé de physique en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE), docteur en didactique des sciences et chercheur associé au laboratoire EST

Thèmes de recherche : pratiques des enseignants du supérieur de la modélisation et de la contextualisation dans le cas particulier de la dynamique des fluides ; apport de l'histoire des sciences à l'enseignement et à la formation scientifique

Publications récentes : Clément Crastes, *Les enseignants du supérieur et l'écoulement interne d'un fluide : modélisation et contextualisation dans différentes disciplines et filières de formation en France et aux États-Unis*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines, Orsay, Université Paris-Saclay, 2019, https://theses.hal.science/tel-02615270 (consulté le 08/04/2024) ;

Clément Crastes & Laurence Maurines, « Enseigner l'écoulement interne d'un fluide en France et aux États-Unis : modèles et contextes au travers des pratiques déclarées d'enseignants du supérieur », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, 2021, p. 59-85, https://doi.org/10.4000/rdst.3913

crastesclement@yahoo.fr

Demuro, Antonietta

Laboratoire de Mathématiques de Lens (UR 2462, faculté des sciences Jean Perrin, université d'Artois)

Maîtresse de conférences en histoire des mathématiques à l'université de Lille

Thèmes de recherche : histoire de la mécanique des fluides et de la balistique en France durant la première moitié du XX^e^ siècle ; interactions entre mathématiques et expérimentation, collaborations entre mathématiciens et physiciens durant la Première Guerre mondiale et la Seconde Guerre mondiale

Publications récentes : Antonietta Demuro, *La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL*, thèse de doctorat, sous la dir. de A. Barberousse & R. Tazzioli, Université de Lille, 2018, https://theses.hal.science/tel-02093155 (consulté le 16/04/2024) ; François Charru & Antonietta Demuro, « La mécanique des fluides à Toulouse durant la Seconde Guerre mondiale : entre opportunités et concurrences disciplinaires », *in* C. Barrera & J. Cantier (dir.), *Science et culture en temps de guerre (XIX^e^-XX^e^ siècles). Actes du colloque international de Toulouse, 6-7 novembre 2020*, Portet-sur-Garonne, Éditions midi-pyrénéennes, 2022, p. 201-218 ; Antonietta Demuro, « The turbulence Theory of P. Wehrlé and G. Dedebant (1934–1948): A Forgotten Probabilistic Approach?", *Archive for History of Exact Sciences*, 2024, https://dx.doi.org/10.1007/s00407-024-00332-6

antonietta.demuro@univ-lille.fr

Hosson, Cécile de

Université Paris Cité ; Laboratoire de didactique André Revuz (EA 4434)

Professeure et chercheuse en didactique de la physique

Thèmes de recherche : étude de l'impact de la mise en récit des savoirs scientifiques sur les apprentissages, inclusion du matériau historique dans l'enseignement de la physique

Publications récentes : Nicolas Décamp & Cécile de Hosson, « Ératosthène et Anaxagore dans l'enseignement scientifique. Embûches et opportunités », *Images des Mathématiques*, 2020, https://images.math.cnrs.fr/Eratosthene-et-Anaxagore-dans-l-enseignement-scientifique.html (consulté le 20/03/2024) ; Catherine Houdement, Cécile de Hosson & Christophe Hache (eds), *Semiotic Approaches in Science Didactics*, London, ISTE/Wiley editions, 2022 ; Cécile de Hosson, Laurence Bordenave, Pierre-Laurent Daures, Nicolas Décamp, Christophe Hache, Julie Horoks & Isabelle Kermen, « Let's Put Mathematics into Comics! A Didactic Analysis of the Comic and Science Workshops », *in*. C. Michelsen, A. Beckmann, V. Freiman, U. T. Jankvist & A. Savard (eds), *Mathematics and Its Connections to the Arts and Sciences (MACAS)*, Cham, Springer International Publishing, 2022, p. 529-551, https://doi.org/10.1007/978-3-031-10518-0_30 ; Cécile de Hosson, Nicolas Décamp, Anaïs Bret & Marion Le Cam, « Analyse d'une évaluation internationale : le cas de l'enquête TIMSS 2019 grade 8 "science" », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 27, 2023, p. 73-99, https://doi.org/10.4000/rdst.4654

cecile.dehosson@u-paris.fr

Maurines, Laurence

Université Paris-Saclay, DidaScO (Didactique des sciences d'Orsay), UR EST (Études sur les sciences et les techniques)

Professeure des universités émérite en didactique des sciences et didactique de la physique

Thèmes de recherche : raisonnements de sens commun à propos des ondes, représentations de la/des science(s) comparativement ou non à d'autres domaines (religions, arts), introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement

Publications récentes : Laurence Maurines & Magali Fuchs-Gallezot, « Un scientifique peut-il être croyant ? Enquête exploratoire auprès d'étudiants entrant en première année d'étude universitaire en sciences », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, 2021, p. 31-58, https://doi.org/10.4000/rdst.3893 ; Laurence Maurines & Patricia Marzin-Janvier, « La formation et le développement pédagogique des enseignants-chercheurs en sciences et technologies : un champ à explorer », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, 2021, p. 9-30, https://doi.org/10.4000/rdst.3888 ; Laurence Maurines & José-Luis Wolfs, « Introduction. Scientifiques, sciences et frontières de la science par rapport à d'autres pratiques culturelles : regards croisés et caractérisations », *in* L. Maurines & J.-L. Wolfs (dir.), *Les multiples dimensions de l'Homme et de la connaissance. Questions épistémologiques, éducatives et culturelles. Journées d'étude (MSH Paris-Saclay, 21 et 22 janvier 2021)*, Gif-sur-Yvette, MSH Paris-Saclay Éditions, 2024, p. 7-28 ; Laurence Maurines, « Étudier les représentations de la créativité du scientifique dans la pratique de modélisation : premiers jalons et résultats exploratoires auprès d'étudiants en CPGEI », *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 29, à paraître

laurence.maurines@universite-paris-saclay.fr

Savaton, Pierre

Département Biologie et Sciences de la Terre, UFR des sciences, Université Caen Normandie ; Centre François Viète d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes

Maître de conférences HDR en épistémologie et histoire des sciences

Thèmes de recherche : Histoire de la géologie (XVIII^e^-XX^e^ siècle), Histoire de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre

Publications récentes : Pierre Savaton, « Une révolution dans l'enseignement des sciences de la Terre en collèges et lycées : l'introduction de la tectonique des plaques. 1980-1988 », *Travaux du Comité français d'histoire et de géologie (COFRHIGEO)*, T. 32, 2018, p. 103-126 ; Pierre Savaton, « L'histoire de la géologie dans la *Revue d'histoire des sciences* de 1947 à 2022 », *Revue d'histoire des sciences*, T. 75, n° 2, 2022, p. 413-443, https://doi.org/10.3917/rhs.752.0413

pierre.savaton@unicaen.fr

Édition et mise en page : Flavie Lavallée
Infographies et graphisme couverture : Thierry Cayatte

APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

VERS UNE INTERDISCIPLINARITÉ DIDACTIQUE – HISTOIRE DES SCIENCES – ÉPISTÉMOLOGIE

Le monde contemporain doit relever de nombreux défis qui nécessitent un regain d'intérêt pour les métiers scientifiques, en particulier de la part des femmes. Ils requièrent également l'acquisition, par tout citoyen, d'une culture scientifique qui lui permette de penser et d'agir dans des contextes variés. Parmi les leviers envisagés pour l'enseignement des sciences par les textes ministériels français relatifs aux réformes de ces vingt dernières années figure l'introduction de l'histoire des sciences et d'éléments de nature épistémologique. Les attendus institutionnels de cette introduction restent peu explicités et opérationnalisés.

Ce volume vise à participer au développement, en France, de travaux sur l'introduction de l'histoire des sciences et de l'épistémologie dans l'enseignement et la formation scientifique (amplement documentés à l'étranger), tout en apportant un regard critique. Il discute des enjeux éducatifs et sociétaux de cette introduction et des questions qu'elle soulève quant aux objectifs d'apprentissage à poursuivre et des stratégies à mobiliser en classe, ainsi que des méthodologies de recherche à mettre en œuvre.

La réflexion est conduite dans le cadre d'un champ disciplinaire donné, la physique. Différents thèmes au programme d'enseignement du secondaire ou du début du supérieur (la vision, le principe d'inertie, le mouvement des planètes, le temps en mécanique relativiste, la dynamique des fluides) sont abordés. Divers objectifs d'apprentissage (appropriation des concepts scientifiques, raisonnement des élèves, représentations de la/des science(s), pensée critique) et deux stratégies d'enseignement (implicite et explicite) sont envisagés.

Les didacticiens, historiens et épistémologues des sciences réunis ici proposent des regards croisés et complémentaires, conduisant à simplifier ou au contraire à enrichir le discours historique, selon les objectifs d'apprentissage visés. Ils montrent ainsi la fécondité d'une réflexion interdisciplinaire.

ISSN : 2800-7891
ISBN : 978-2-9590898-2-4
EAN : 9782959089824