



De l'exploration de quelques liens entre histoire des sciences, compréhension conceptuelle et attitude critique

Nicolas Décamp

► To cite this version:

Nicolas Décamp. De l'exploration de quelques liens entre histoire des sciences, compréhension conceptuelle et attitude critique. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université de Paris, 2021. tel-03117071

HAL Id: tel-03117071

<https://theses.hal.science/tel-03117071>

Submitted on 20 Jan 2021

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

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

Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des
recherches

**De l'exploration de quelques liens
entre histoire des sciences,
compréhension conceptuelle et
attitude critique**

Soutenue le 14 janvier 2021, par :

Nicolas Décamp

Devant le jury composé de :

Cécile de Hosson

Professeure, Université de Paris

Valérie Munier

Professeure, Université de Montpellier

Jim Plumat

Professeur, Université de Namur

François Gallet

Professeur, Université de Paris

Laurence Maurines

Professeure, Université Paris-Saclay

Présidente

Rapporteure

Rapporteur

Examineur

Examinatrice

Table des matières

1	Résumé introductif	1
1.1	Histoire des sciences et didactique	1
1.2	Développement conceptuel et critique	2
1.3	Perspectives	3
2	Histoire des sciences et didactique	5
2.1	Histoire des sciences et conceptions	5
2.2	L’histoire de la pression	6
2.3	Le cadre de la reconstruction didactique	11
2.4	Mesure de la Terre par Ératosthène	14
2.5	Discussion	19
3	Le développement de l’attitude critique	21
3.1	La datation au carbone 14	21
3.2	Contexte et cadre d’analyse	24
3.3	Méthodologie	26
3.4	Premiers résultats	29
3.5	Généralisation et catégorisation	31
4	Quelques perspectives	35
4.1	Perspectives sur l’utilisation de l’histoire	35
4.2	Former à l’analyse critique ?	39
4.3	Quelques perspectives conjointes ?	45
A	Le procédé d’Ératosthène	51
B	La cosmologie des Zhou	53
B.1	le Chin shu ou « histoire des Chin »	53
B.2	Le Zhou Bi Suan Jing	54
C	Extrait du « discours » de Galilée	57

Chapitre 1

Résumé introductif

Dans cette note de synthèse, je suivrai deux axes principaux. Ces deux axes ont en effet alimenté l'essentiel de mes travaux de recherche en didactique.

1.1 Histoire des sciences et didactique de la physique

Le premier de ces deux axes est celui par lequel je suis entré dans la recherche en didactique de la physique. L'histoire des sciences et la didactique de la physique sont souvent présentées comme des disciplines pouvant s'enrichir l'une l'autre, certains auteurs allant jusqu'à évoquer un parallèle entre les difficultés d'apprentissage scolaire d'un concept donné et les difficultés rencontrés par les savants lors de la construction historique de ce même concept. Si un parallélisme strict ne résiste pas à l'analyse, il n'en reste pas moins que l'histoire des sciences a servi de source d'inspiration à de nombreuses activités scolaires. Cécile de Hosson a formalisé un cadre méthodologique d'élaboration de ces séquences d'enseignement : la « reconstruction didactique » (HOSSON 2011). Dans ce cadre, nous avons analysé ensemble quelques exemples de transposition scolaire de découvertes historiques pour en montrer les écarts mais aussi les potentialités parfois inexploitées et quelques limites d'usage. Les articles sur lesquels je m'appuierai pour cette partie sont les suivants : DÉCAMP et HOSSON 2011 ; HOSSON et DÉCAMP 2011 ; DÉCAMP et HOSSON 2012 ; HOSSON et DÉCAMP 2014 ; HOSSON et DÉCAMP 2015b ; DÉCAMP et HOSSON 2018 ; DÉCAMP et HOSSON 2020. Cette thématique nous a également amené à participer à un symposium à l'ESERA (HOSSON et DÉCAMP 2015a) et à proposer en commun quelques sujets de thèse sur le concept de pression en 1ere (cf également HOSSON et DÉCAMP 2015b), sur le

concept de champ en 1ère S et sur le second principe de la thermodynamique à l'Université. Enfin, c'est également à cette thématique que je rattacherai la thèse de Charlotte de Varent (VARENT 2018), que j'ai co-encadrée avec Christine Proust (laboratoire SPHERE, UMR 7219).

1.2 Développement de l'attitude critique et de la compréhension conceptuelle

Le deuxième axe que j'approfondirai dans cette note de synthèse s'inscrit dans un contexte international où un objectif prioritaire dans l'enseignement des sciences physiques est le développement des compétences et attitudes, parmi lesquelles au tout premier chef « l'esprit critique ». La question des liens entre le déclenchement de l'attitude critique et celle de la compréhension des concepts est moins évidente qu'il n'y paraît. Avec Laurence Viennot, nous avons choisi d'aborder cette question au niveau de la fin de formation universitaire des enseignants de physique-chimie, puisque cette population est appelée à jouer un rôle majeur dans la formation critique et conceptuelle des élèves du secondaire. Pour cela, nous avons mis en œuvre des entretiens individuels longs (1h environ) sur un thème donné de sciences physiques, sur la base de documents en usage courant et nous avons analysé les évolutions imbriquées des participants sur le plan de leur attitude critique et de leur compréhension du domaine. Sur le plan critique, nos études (DÉCAMP et VIENNOT 2015 ; VIENNOT et DÉCAMP 2016a ; VIENNOT et DÉCAMP 2016b ; VIENNOT et DÉCAMP 2018b ; DÉCAMP et VIENNOT 2018) ont montré que l'évolution la plus fréquemment observée est celle de la « critique différée » : le participant reste (plus ou moins) longtemps dans une attitude de passivité critique face à des documents dont la valeur explicative est contestable alors qu'il/elle a, a priori, des connaissances tout à fait suffisantes pour les mettre en cause. Puis, à une étape qui apparaît comme liée à un seuil de compréhension (lequel dépasse la simple nécessité logique), la passivité critique fait place à l'expression de frustration intellectuelle, de questions critiques, et d'auto-critiques. L'évocation de souvenirs scolaires défaillants fait alors place à un engagement personnel et exigeant dans une recherche de compréhension.

Une critique « précoce » est beaucoup plus rare mais cependant possible. Enfin, il arrive que certains experts du sujet choisi ne réagissent pas du tout sur le plan critique : nous parlons alors d'anesthésie experte pour désigner un cas où les points défaillants du texte considéré sont peut-être complétés inconsciemment par le participant.

En l'état actuel de nos résultats, il semble qu'un découplage total de l'attitude critique d'avec la compréhension soit une hypothèse peu plausible. En revanche, les liens entre les évolutions des participants au cours des entretiens sur chacun de ces plans apparaissent complexes. Il faut très probablement tenir compte de facteurs méta-cognitifs-affectifs pour les interpréter. Ceci rend particulièrement nécessaire de centrer le développement de cette recherche vers une analyse plus précise des conditions et modalités de l'activation de l'analyse critique (au-delà de la seule idée de seuil de compréhension). Ces études ont été résumées dans VIENNOT et DÉCAMP 2018a. Nous avons également publié un livre (VIENNOT et DÉCAMP 2019, ou, en version anglaise VIENNOT et DÉCAMP 2020), ce qui nous a permis un début de formalisation quant aux types de failles ou aux facteurs de risque que l'on pouvait trouver dans les explications et aux évolutions de l'attitude critique des enseignants que nous avons interrogés lors de nos entretiens sur ces textes explicatifs.

1.3 Perspectives

Enfin, à la suite de cette synthèse de nos premiers travaux, nous évoquerons également quelques perspectives de recherche. Celles-ci prolongent bien sûr les deux thèmes évoqués précédemment.

En ce qui concerne le travail sur l'articulation entre didactique et histoire des sciences, le nouveau programme d'enseignement scientifique du cycle terminal du lycée nous semble un terrain particulièrement intéressant. Les nombreux thèmes historiques qu'il contient seront un terrain fertile pour nos recherches. Caractériser les connaissances épistémologiques (objectif affiché du programme) qui seront réellement abordées dans les classes et à quelle condition, la manière dont les professeurs s'en empareront et les articuleront avec les connaissances conceptuelles, et bien sûr les acquisitions des élèves à l'issue de cet enseignement sont autant de pistes à explorer.

Pour ce qui est du lien entre l'attitude critique et le développement conceptuel, nos premiers travaux ont montré que l'évolution la plus fréquente était caractérisée par une critique tardive. La question de la formation à la critique est donc toute naturelle. A cette fin, nos premières formalisations relatives aux types de failles ou aux facteurs de risques face aux textes étudiés pourront être un outil utile. Reste bien sûr à documenter les réactions et l'évolution des participants à de telles formations. Dans le cas où ces participants sont des enseignants, un « deuxième niveau » de recherche est également envisageable, celui consistant à examiner la manière dont ces enseignants s'empareront à leur tour de ces outils et ce qu'ils mettront en place dans leurs classes.

Enfin, l'exercice un peu formel que constitue une HDR invite naturellement à rechercher des liens entre les différentes lignes de recherches que l'on a suivi. Dans notre cas, cet exercice conduit à s'interroger sur deux points qui sont également des perspectives possibles de nos travaux :

- le premier concerne l'utilisation de l'histoire des sciences pour développer de l'attitude critique. Celle-ci est régulièrement mise en avant à cette fin (par exemple par le biais des controverses) mais qu'en est-il réellement et à quelles conditions est-ce une piste intéressante ?
- à l'inverse on pourra également se demander si l'exercice critique s'exerce indifféremment sur des textes historiques ou des explications physiques plus récentes et sur ce qui différencie ces situations...

Nous agrémenterons cette discussion portant sur des perspectives conjointes à l'aide de quelques exemples glanés ça et là au cours de nos premières études.

Chapitre 2

Histoire des sciences et didactique de la physique

2.1 Histoire des sciences et conceptions

Le coup d'œil sur l'histoire, le recul vers une période passée, ou comme aurait dit Racine, vers un pays éloigné, vous donne des perspectives sur votre époque et vous permet d'y penser davantage, de voir davantage les problèmes qui sont les mêmes ou au contraire les problèmes qui diffèrent, ou les solutions.

Cette phrase de Marguerite Yourcenar¹ résume en quelques mots certaines des raisons pour lesquelles les chercheurs en didactique de la physique se sont intéressés à l'histoire des sciences. Il est en effet possible, pour prendre du recul sur un concept donné, d'examiner l'évolution historique de ce concept, la manière dont il s'est construit et développé au cours du temps. Certains sont allés plus loin et ont avancé l'hypothèse d'une forme de parallélisme entre les difficultés d'apprentissages de certains concepts chez les élèves et les obstacles historiques lors de la construction de ce même concept. On peut ici penser à HALBWACHS 1974, voire même à BACHELARD 1938. Plus spécifiquement, cette voie a été explorée en mécanique par VIENNOT 1979 (qui évoque un parallèle entre certaines conceptions des élèves et la notion historique d'*impetus*), en électricité par BENSEGHIR 1989, en optique par GUESNE 1984, pour ne citer que quelques articles.

Il est cependant assez vite apparu que ce parallélisme était limité, et des mises en garde se sont fait entendre dès les années 80 comme le rappelle MARTINAND 1993 dans sa revue de littérature sur les différents travaux di-

1. phrase que l'on peut entendre tous les samedis matins sur France Culture lors du générique de l'émission radiophonique « Concordance des temps » de Jean-Noël Jeanneney

dactiques portant sur l'histoire des sciences. Citons, en ce qui concerne la mécanique, SALTIEL et VIENNOT 1985, ou encore ce titre d'article ironique de LYTHCOTT 1985 qui dit bien le danger d'un trop grand systématisme : « Aristotelian was given as the answer, but what was the question ? »².

Cependant, s'il n'est clairement pas raisonnable d'envisager un parallélisme strict, car de nombreux éléments de contexte et de connaissance diffèrent entre une époque donnée et la nôtre, les situations proposées par l'histoire des sciences peuvent parfois se montrer intéressantes pour éclairer un concept physique. Nous allons tout de suite en donner un exemple à propos de la pression atmosphérique (HOSSON et DÉCAMP 2015b).

2.2 L'histoire de la pression

L'étude de la pression était présente dans les anciens programmes de seconde de 2010 à l'occasion du thème du « sport » (MEN 2010a). Elle l'est à nouveau, mais apparaît cette fois dans les programmes de spécialité physique-chimie de première (MEN 2019d). Comme on peut le constater dans la table 2.1, parmi les notions à aborder la relation fondamentale de l'hydrostatique se voit à nouveau occuper une place de choix. On note également que la pression atmosphérique n'est pas spécifiquement mentionnée. Enfin, le lien qualitatif qui doit être fait entre les grandeurs macroscopique de description **d'un fluide** (c'est nous qui soulignons) et le comportement microscopique des entités nous semble un point intéressant. Si ce lien peut être explicité aisément dans le cas d'un gaz, il est notablement plus complexe pour un liquide. Il faut en effet dans ce dernier cas compter non seulement avec la pression cinétique mais également avec la pression dynamique (ou pression moléculaire) et donc avec les interactions au sein du liquide, ce qui complique singulièrement la situation (cf par exemple DIU et al. 1989, complément III.C.IV). Il sera central d'expliquer alors que ces deux états de la matière partagent certaines de leur propriétés macroscopiques (en particulier la loi de l'hydrostatique) alors même que les modélisations microscopiques qui en sont proposées diffèrent complètement.

Les difficultés des élèves au sujet de la pression ont largement été explorées (SÉRÉ 1982 ; ENGEL CLOUGH et DRIVER 1985 ; ROZIER et VIENNOT 1991 ; KARIOTOGLOU et PSILLOS 1993 ; TYTLER 1998 ; BESSON 2004 ; BESSON et VIENNOT 2004 ; HOSSON et CAILLAREC 2009). Nous ne chercherons pas ici

2. ADAIR 2013 a récemment critiqué l'interprétation d'Aristote présentée par LYTHCOTT 1985, interprétation erronée liée selon lui à des erreurs de traduction en langue anglaise ainsi qu'à un focus trop important sur la *Physique* et un manque d'intérêt pour le traité *Du Ciel*.

TABLE 2.1 – Extrait des programmes de la spécialité physique-chimie en première (MEN 2019d) : Description d'un fluide au repos

Échelles de description.	Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopique de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent.
Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température.	
Modèle de comportement d'un gaz : loi de Mariotte	Utiliser la loi de Mariotte. <i>Tester la loi de Mariotte, par exemple en utilisant un dispositif comportant un micro-contrôleur.</i>
Actions exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes.	Exploiter la relation $F = P.S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane S soumise à la pression P .
Loi fondamentale de la statique des fluides.	Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho g(z_1 - z_2)$. <i>Tester la loi fondamentale de la statique des fluides.</i>

à en faire une recension exhaustive. Nous pouvons néanmoins retenir que chez les élèves de primaire, la matérialité de l'air (dont sa masse) est difficilement perçue, et qu'ils n'envisagent la pression que lorsque l'air est comprimé ou en mouvement (SÉRÉ 1982). Cette difficulté à « sentir » la présence de l'air persiste d'ailleurs chez les étudiants d'université, puisque HOSSON et CAILLAREC 2009 ont montré, lors d'une étude sur le baromètre de Torricelli, que trois quarts des 128 étudiants qu'elles avaient interrogés ne prenaient pas en compte l'action de l'air extérieur pour expliquer la sustentation de la colonne de mercure. Parmi les autres difficultés classiques des élèves du secondaire, notons la confusion entre pression et force pressante (KARIOTOGLOU et PSILLOS 1993), le fait que l'action de ces forces pressantes est souvent perçue comme étant liée au volume total du fluide entourant l'objet immergé plutôt qu'à sa profondeur d'immersion et que cette action est souvent envisagée comme uniquement dirigée verticalement et vers le bas plutôt que comme isotrope (ENGEL CLOUGH et DRIVER 1985 ; KARIOTOGLOU et PSILLOS 1993 ; BESSON et VIENNOT 2004). Considérer que les gaz et les liquides partagent certaines propriétés semble également compliqué : certains élèves pensent, à tort, que la pression atmosphérique augmente avec l'altitude (TYTLER 1998), alors qu'ils considèrent généralement avec raison que la pression dans un liquide augmente avec la profondeur (BESSON 2004 ; KARIOTOGLOU et PSILLOS 1993). Enfin le vide pose également des problèmes particuliers aux élèves qui l'associent parfois à certaines propriétés spécifiques comme l'aspiration (ENGEL CLOUGH et DRIVER 1985).

En considérant l'histoire du concept de pression, certains épisodes nous ont semblé particulièrement pertinents pour travailler ces difficultés conceptuelles et nous avons proposé dans HOSSON et DÉCAMP 2015b une reconstruction historique du concept de pression atmosphérique et la constitution d'un dossier documentaire de sources primaires utilisable en classe de physique-chimie.

Si nous décidons de laisser de côté le passage du problème technique (l'impossibilité pour les pompes aspirantes de hisser une colonne d'eau au-delà de 10 mètres) au problème scientifique (passage au cours duquel Galilée a joué un rôle central), différents épisodes nous ont semblé être des nœuds à la fois didactiques et historiques :

- le premier peut être illustré par l'expérience de Berti et Magiotti (cf figure 2.1). Ces savants italiens ont mis en place un dispositif constitué d'une cuve remplie d'eau et surmontée d'un long tuyau, dispositif qu'on qualifierait aujourd'hui de dispositif torricellien. Ils ont montré qu'il y avait équivalence entre la réalisation de cette expérience par « déversement » ou par « aspiration » de la colonne d'eau. Dans les deux cas, celle-ci se maintient en effet à une hauteur d'environ 10

mètres. Cette expérience nous paraît particulièrement intéressante car elle « symétrise » en quelque sorte le problème et permet de se rendre compte que l'explication, systémique, est liée à une différence (ici une différence de pression) entre le haut et le bas du dispositif, plutôt qu'à la seule aspiration.

- la lettre de Torricelli à Ricci du 11 juin 1644 peut éclairer le second épisode. Torricelli y détaille une version de l'expérience de Berti et Magiotti où l'eau est remplacée par du mercure. Cette expérience, dans laquelle la hauteur de liquide est cette fois de 76 cm, permet *in fine* de comparer les fluides que sont le mercure, l'eau et l'air et de montrer que pour deux fluides différents, les hauteurs sont dans le rapport de leurs masses volumiques. Dans cette lettre, Torricelli explicite clairement que l'eau et l'air se comportent de la même façon lorsqu'on y plonge des objets : « Nous vivons immergés au fond d'un océan de l'élément air dont on sait, par des expériences indubitables, qu'il est pesant[...] ». Cette lettre permet donc de faire un premier lien entre liquides et gaz et de relier la pression aux différentes hauteurs de fluide.
- enfin, la correspondance de Pascal et Florin Périer et la fameuse expérience du Puy-de-Dôme nous paraît également une étape essentielle dans la compréhension de la pression atmosphérique dans la mesure où c'est l'un des jalons qui permet de se convaincre de l'effet de l'air et par ricochet du « vide »³ qui se situe dans l'espace torricellien.

Très récemment, Anne Boulais a repris et a poursuivi de manière beaucoup plus approfondie cette exploration historique à l'occasion de sa thèse de doctorat, thèse que Cécile de Hosson et moi-même co-encadrons. Son travail lui a notamment permis de mettre en lumière la lettre de réponse de Ricci à Torricelli en date du 18 juin 1644. Cette lettre est captivante, car elle présente les arguments de Ricci « contre » l'explication avancée par Torricelli du maintien de la colonne de mercure par l'hypothèse du poids de la colonne d'air. Ses arguments sont passionnants : le premier consiste à faire remarquer que si l'on recouvre la surface du mercure contenu dans la cuve par un couvercle hermétiquement fermé, la hauteur de la colonne de mercure dans le tube se maintient... Or en recouvrant la cuve par ce couvercle on a « coupé » la colonne d'air. Comment, demande Ricci, le poids de l'air pourrait-il donc continuer à agir ? Le deuxième argument avancé par Ricci est le suivant : si l'on bouche une seringue à son extrémité, on a alors la plus grande peine à tirer sur son piston. Si l'explication de cette difficulté réside elle-aussi dans le poids de l'air, comment expliquer que la peine soit la même lorsque le piston

3. pour être tout à fait exact il s'agit de mercure à pression de vapeur saturante

FIGURE 2.1 – Représentation de l'expérience de Berti et Magiotti. Si l'on remplit la cuve posée sur le sol d'eau et que l'on aspire l'air du tuyau par le trou situé en haut du tuyau (en D), on constate que l'eau ne s'élève pas au-delà d'une hauteur d'environ 10 m. Alternativement on peut commencer par boucher le bas du tuyau (en R), remplir ce tuyau d'eau par le haut, puis fermer le haut du tuyau (en D) et rouvrir le bas du tuyau ; on constate alors que l'eau commence par s'écouler dans la cuve située au sol puis que le phénomène s'arrête lorsque la hauteur de la colonne d'eau est de 10 m.



de la seringue est horizontal et lorsqu'il est vertical ? Dans les deux cas, ces contre-arguments nous semblent remarquables. S'ils seraient aisément explicables aujourd'hui à l'aide d'un modèle particulière, ils pourraient tout à fait être avancés par certains élèves ayant du mal à faire le lien entre le « poids de la colonne d'air » et l'isotropie des forces pressantes. Ce qui est tout à fait symptomatique, c'est que cette lettre était jusqu'à sa redécouverte par Anne Boulais, un peu oubliée (j'ai d'ailleurs dû la traduire de l'italien au français à sa demande), alors que la lettre de Torricelli est, de son côté, très régulièrement citée. Cet exemple montre bien comment le chercheur en didactique (ici la chercheuse) est guidé dans son enquête historique sur un concept donné par les difficultés des élèves et que sa reconstitution de l'histoire de ce concept doit autant aux résistances qu'aux évolutions. Il nous amène tout naturellement à présenter le cadre de la reconstruction didactique.

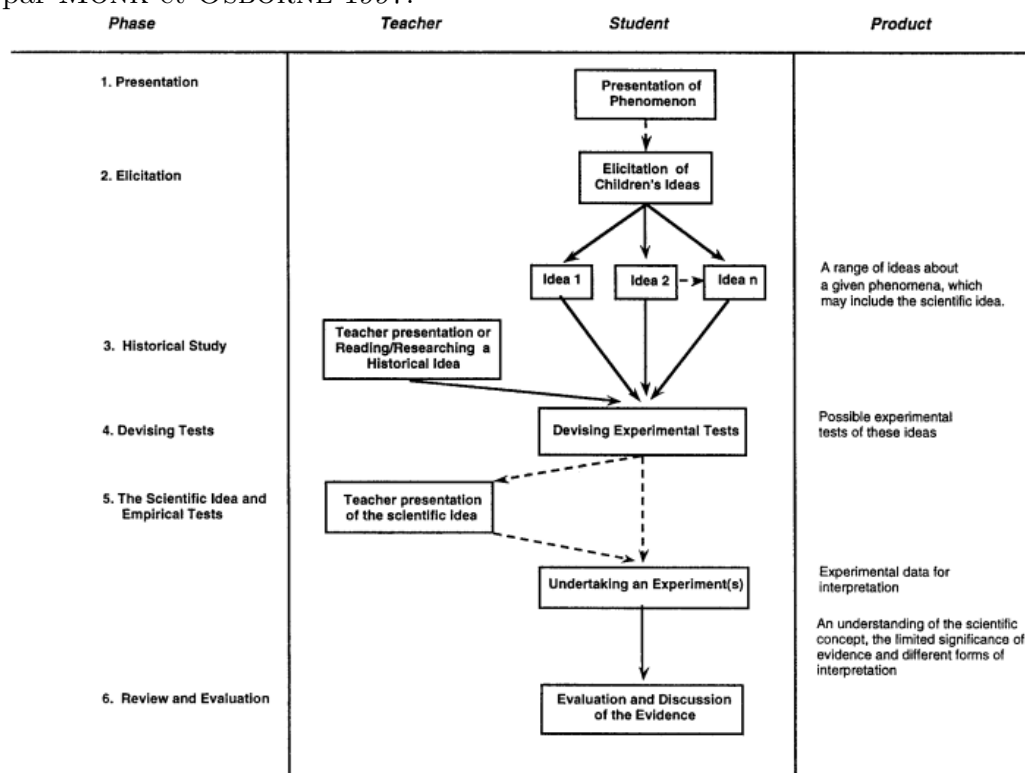
2.3 Le cadre de la reconstruction didactique

Cécile de Hosson a proposé en 2011 un cadre guidant « l'élaboration de séquences d'enseignement incluant une dimension historique et se donnant pour but, non pas d'approcher la nature des sciences, mais de favoriser l'apprentissage d'un concept ou d'une loi scientifique » (HOSSON 2011).

En effet, dans les publications de recherche sur l'utilisation de l'histoire des sciences dans l'enseignement de la physique, C. de Hosson dégage deux grandes tendances : l'une est à visée plutôt conceptuelle (LOCKHEAD et DUFRESNE 1989 ; MONK et OSBORNE 1997 ; GALILI et HAZAN 2000 ; MERLE 2002 ; GUEJ 2005) et l'autre cherche plutôt à développer de meilleures connaissances épistémologiques (LAUGIER et DUMON 2000 ; IRWIN 2000 ; KIPNIS 2001 ; KUBLI 2001 ; RUDGE et HOWE 2004 ; MAURINES et MAYRARGUE 2007 ; MAURINES, BEAUFILS et CHAPUIS 2009 ; MAURINES, BEAUFILS et NAIT BOUDA 2013), cette dernière étant à rapprocher du courant NoS (Nature of Science). Elle note que ces deux objectifs sont difficiles à viser simultanément (GOHAU 2002) et remarque que si, dans le second cas, des sources historiques de première main sont souvent présentes, quand le but est à visée conceptuelle l'insertion historique est plutôt présentée sous la forme d'un problème à résoudre, sans forcément que des textes historiques ne l'alimentent.

Son cadre vise à la fois à préserver l'historicité (rendre l'histoire des sciences plus effective) et à améliorer les apprentissages conceptuels (rendre l'histoire des sciences plus efficace). Il s'inspire du modèle pédagogique de MONK et OSBORNE 1997 (cf. figure 2.2) qui suppose implicitement qu'il existe des similarités entre certaines idées des savants et des élèves et que

FIGURE 2.2 – Représentation synthétique du modèle pédagogique présenté par MONK et OSBORNE 1997.



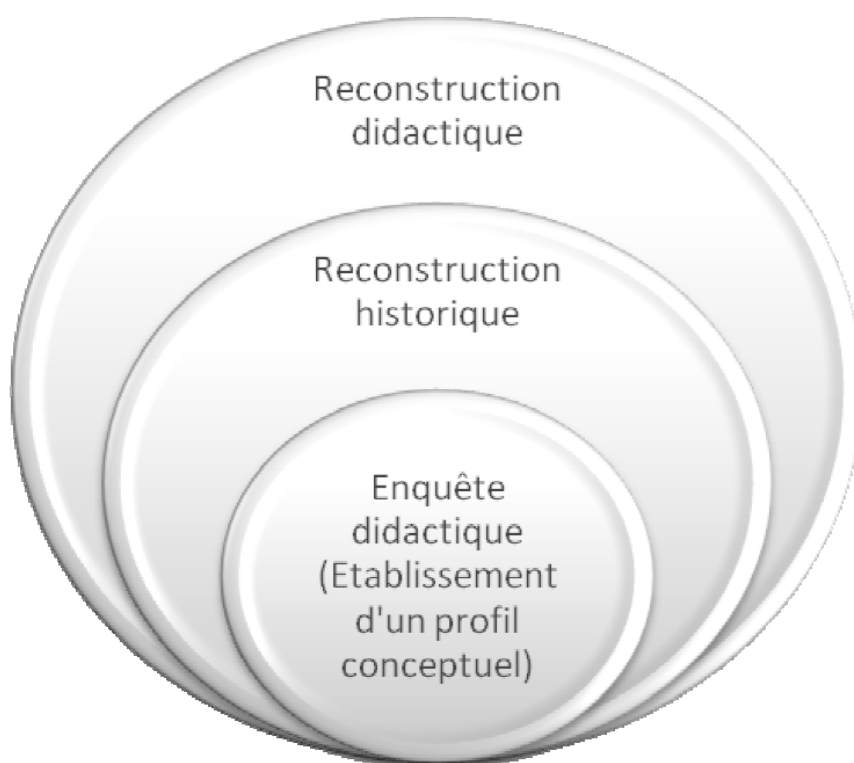
des expériences permettent de les confirmer.⁴ Cependant, alors qu'habituellement (et dans le modèle de MONK et OSBORNE 1997), l'histoire ne sert qu'à installer le débat et que sa résolution est généralement expérimentale, C. de Hosson propose d'aller plus loin et de prendre également en compte les solutions historiques, quitte à les réorganiser.

Ainsi donc, la reconstruction didactique comprend tout à la fois (cf. figure 2.3) :

- une enquête didactique visant à analyser les savoirs physiques enseignés et à identifier le profil conceptuel d'une population donnée face à ces savoirs (difficultés, modes de raisonnements, ...).
- une enquête historique guidée par l'enquête didactique et visant une

4. il paraît important de rappeler ici que cette vision du lien entre théorie et expérience est très naïve : d'une part, parce qu'on considère généralement en physique qu'une théorie n'est que provisoirement acceptée (et non confirmée), et ce, tant qu'elle n'est pas invalidée à son tour, et d'autre part parce qu'une réfutation par une expérience est également compliquée : une expérience seule ne suffit pas, il faut classiquement s'appuyer sur d'autres hypothèses qui, elles-mêmes ne peuvent être complètement sûres...

FIGURE 2.3 – Représentation synthétique de l'organisation d'un projet de reconstruction didactique selon HOSSON 2011.



- reconstruction historique du concept physique étudié.
- une réorganisation des éléments historiques afin de favoriser l'acquisition du savoir visé.

Si le premier de ces éléments semble aller de soi, les deux autres peuvent surprendre. En effet, une enquête historique guidée par une enquête didactique ne risque-t-elle pas d'être biaisée, et la réorganisation des éléments ne risque-t-elle pas de fausser encore un peu plus l'ensemble ? À ces objections on pourra répondre d'une part qu'il n'existe pas de projet de reconstruction historique neutre, et d'autre part que toute transposition didactique (VERRET 1975 ; CHEVALLARD 1991) nécessite des étapes de « décontextualisation » et de « recontextualisation ».

2.4 La mesure de la circonférence terrestre par Ératosthène

Pour illustrer le cadre précédemment exposé, examinons ici un épisode historique devenu un classique de l'histoire des sciences dans l'enseignement de la physique : la mesure de la circonférence terrestre par Ératosthène. Et commençons par en faire un très succinct résumé historique (on pourra trouver plus de détails dans DÉCAMP et HOSSON 2011 ou DÉCAMP et HOSSON 2012).

L'ouvrage original d'Ératosthène *Sur la mesure de la Terre* est aujourd'hui perdu et nous ne pouvons nous référer qu'à des sources indirectes pour reconstituer sa démarche. Si l'on se limite aux sources antiques, la plupart d'entre-elles se contentent de citer la valeur trouvée par Ératosthène (250 000 ou 252 000 stades selon les auteurs). Cléomède fait exception parmi ces auteurs et expose dans son ouvrage *Théorie élémentaire* (ou *De motu circulari corporum celestium*) la méthode qu'Ératosthène aurait suivi⁵. On pourra retrouver l'intégralité de son récit dans l'Annexe A.

Pour exposer la méthode d'Ératosthène, Cléomède commence par faire cinq hypothèses :

1. Syène (l'actuelle Assouan) et Alexandrie sont situées sur le même méridien ;
2. la distance entre Syène et Alexandrie est connue (5 000 stades) ;
3. les rayons envoyés par le Soleil arrivent sur Terre parallèles entre eux ;
4. les droites sécantes des parallèles forment des angles alternes égaux ;
5. les arcs de cercle qui reposent sur des angles égaux sont semblables.

Il déduit ensuite de l'hypothèse 1 que si l'on mesure le « grand cercle de la Terre » passant par Alexandrie et Syène, on obtiendra la circonférence terrestre. Puis il fait remarquer qu'au solstice d'été, à Syène (S sur la figure 2.4) qui se situe sur le tropique du Cancer, les gnomons des cadrans solaires hémisphériques (ou scaphé, cf. figure 2.5) sont sans ombre, alors qu'au même moment, ceux situés à Alexandrie (A sur la figure 2.4) projettent une ombre (DA sur la figure 2.4) dont la longueur mesurée correspond à environ $1/50^{\text{e}}$ du périmètre total de la sphère du scaphé. Par ailleurs, comme les rayons solaires sont parallèles (hypothèse 3), les angles AOS et AED sont égaux (hypothèse 4). Les arcs de cercles AS et AD sont donc semblables (hypothèse 5).

5. notons toutefois qu'il faut rester très prudent quant à son récit car l'ouvrage de Cléomède a été écrit plusieurs siècles après la mesure d'Ératosthène qu'il relate.

FIGURE 2.4 – Schéma représentant la méthode d'Ératosthène selon le récit de Cléomède

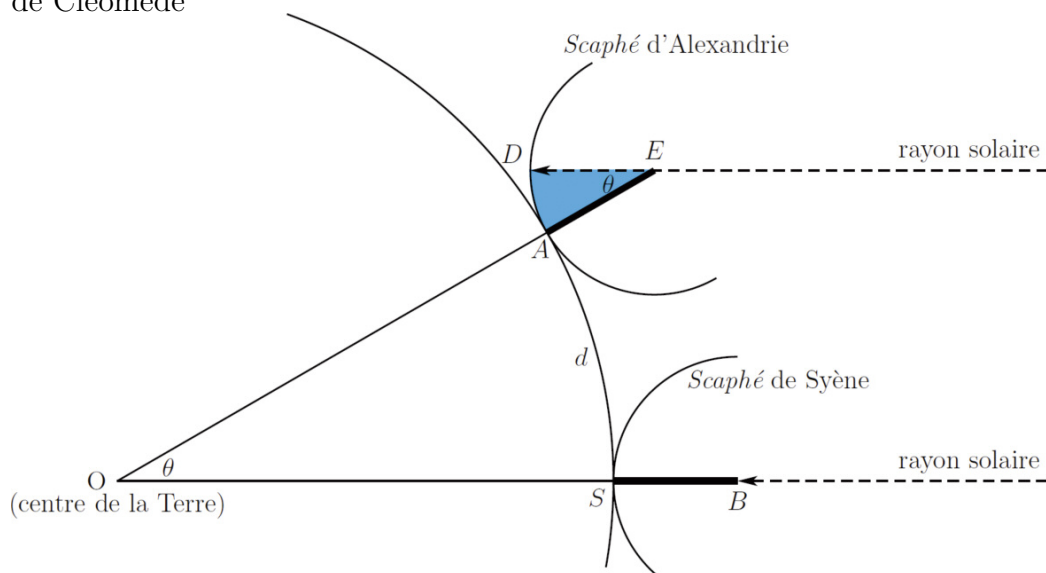


FIGURE 2.5 – Cadran solaire hémisphérique ou scaphé.

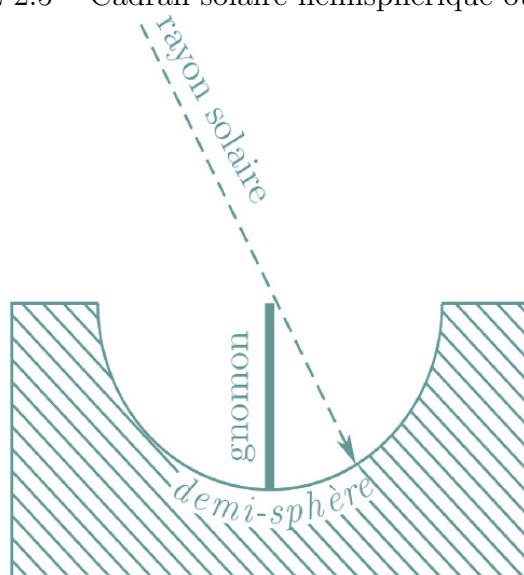
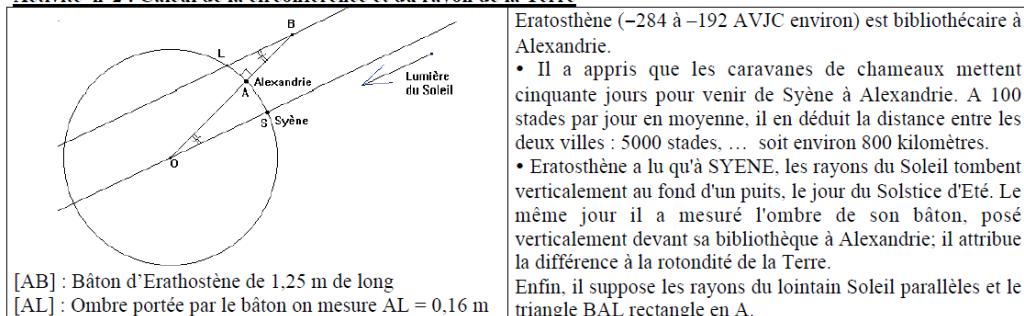


FIGURE 2.6 – Un exemple d'activité à propos de la mesure d'Ératosthène.

Activité n°2 : Calcul de la circonférence et du rayon de la Terre

Ératosthène (–284 à –192 AVJC environ) est bibliothécaire à Alexandrie.

- Il a appris que les caravanes de chameaux mettent cinquante jours pour venir de Syène à Alexandrie. A 100 stades par jour en moyenne, il en déduit la distance entre les deux villes : 5000 stades, ... soit environ 800 kilomètres.

- Ératosthène a lu qu'à SYÈNE, les rayons du Soleil tombent verticalement au fond d'un puits, le jour du Solstice d'Été. Le même jour il a mesuré l'ombre de son bâton, posé verticalement devant sa bibliothèque à Alexandrie; il attribue la différence à la rotondité de la Terre.

Enfin, il suppose les rayons du lointain Soleil parallèles et le triangle BAL rectangle en A.

2a) D'après les mesures d'Ératosthène à Alexandrie, donner une valeur de l'angle $\widehat{ABL}$ au dixième près.

2b) Que peut-on dire des angles $\widehat{ABL}$ et $\widehat{AOS}$? Justifier par une démonstration.

2c) Connaissant la distance Alexandrie-Syène, calculer la circonférence de la Terre (choisir une unité appropriée).

2d) Calculer ainsi une valeur approchée au km près du rayon de la Terre.

En se basant sur les graduations du scaphé, Ératosthène constate que l'arc de cercle AD est égal à $1/50^{\circ}$ du cercle total correspondant ; il en déduit que l'arc de cercle AS est lui aussi égal à $1/50^{\circ}$ de son cercle total, c'est-à-dire $1/50^{\circ}$ de la circonférence terrestre. Enfin, comme AS vaut 5000 stades (hypothèse 2), il en conclut que la circonférence terrestre vaut : $50 \times 5000 = 250\,000$ stades.

Cette épisode historique était explicitement dans le programme de physique-chimie de seconde de 1999 (MEN 1999) :

« Comment mesurer le rayon de la Terre ? *Méthode d'Ératosthène* »

En étudiant les activités proposées dans les différents manuels de l'époque on observe les tendances suivantes, que l'exemple en figure 2.6 permet d'illustrer :

Tout d'abord on constate que l'histoire est souvent malmenée. Pour ne citer que les deux écueils les plus récurrents :

- il est régulièrement fait mention de caravanes de chameaux pour la mesure de la distance Syène-Alexandrie, précision qui est absente du texte de Cléomède. Selon DUTKA 1993, il s'agit d'un mythe véhiculé par l'histoire de la géodésie. Selon lui, les chameaux furent introduits en Afrique du Nord par Alexandre le Grand, mais les caravanes de chameaux n'étaient pas répandues avant l'ère chrétienne. Certains historiens évoquent plutôt la possibilité que cette distance ait été mesurée par des bématises, hommes entraînés à faire des pas réguliers tout en les comptant pour établir des distances. Ces bématises ont été notamment largement utilisés par Alexandre le Grand lors de ses campagnes

militaires.

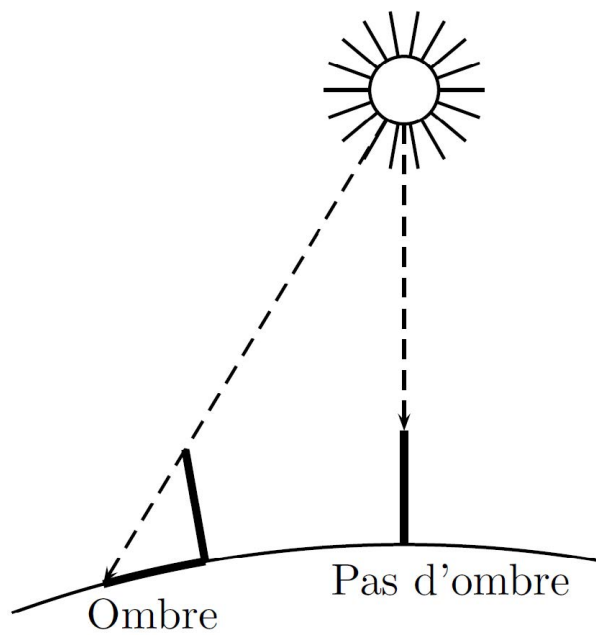
- il est également souvent fait mention d'un bâton vertical ou d'un obélisque qu'Ératosthène aurait utilisé pour en mesurer l'ombre et en déduire l'angle. Rien n'empêche que ce soit le cas, même si rien ne l'indique dans le texte de Cléomède, qui mentionne au contraire des cadrans solaires hémisphériques (cf figure 2.5). Mais si la fonction arc-tangente est utilisée pour remonter de ces mesures de distances à la mesure d'angle, comme on peut le supposer dans l'exemple de la figure 2.6, cela se révèle très anachronique puisque la tangente est un outil mathématique apparu bien après Ératosthène...

Par ailleurs, outre ces défauts d'historicité, les conceptions des élèves ne sont également presque jamais prises en compte par les activités proposées. En effet, si l'on interroge les élèves sur la raison pour laquelle les gnomons ont une ombre à Alexandrie et n'en ont pas à Syène en leur demandant de schématiser la situation, ceux-ci utilisent un modèle de rayons solaires divergents pour expliquer ce phénomène et font apparaître le Soleil sur leurs dessins, comme on l'a illustré en figure 2.7 (MERLE 2002 ; FARGES et al. 2002 ; DUCOURANT 2007). La difficulté conceptuelle autour de cet épisode historique réside donc selon nous essentiellement dans la modélisation physique du phénomène et en particulier dans le passage à la limite qui permet d'expliquer que les rayons peuvent être considérés comme quasi-parallèles, passage à la limite qui n'est que très rarement travaillé.

Nous avons donc proposé (DÉCAMP et HOSSON 2011 ; DÉCAMP et HOSSON 2012) une reconstruction didactique liée à la connaissance de ces difficultés des élèves, dont nous rappelons ici brièvement les principales étapes :

1. La première étape de cette reconstruction consiste à présenter aux élèves le fait observationnel pré-cité (pas d'ombre pour un gnomon vertical à Syène, une ombre pour un gnomon vertical à Alexandrie) et à leur demander de proposer un schéma explicatif.
2. Ces schémas sont ensuite discutés collectivement et le modèle qui émerge généralement d'une Terre plate et d'un Soleil proche (modèle souvent attribué à Anaxagore) et qui permet d'estimation de la distance Terre-Soleil peut alors être mis en regard du modèle d'une Terre sphérique et d'un Soleil éloigné (étape 2).
3. Dans la troisième étape, on propose de traiter le modèle « Terre sphérique - Soleil éloigné » à l'aide du texte de Cléomède et d'éviter ainsi les ajouts anachroniques. Les élèves sont incités à discuter de l'architecture du texte, des hypothèses sous-jacentes à la procédure décrite par Cléomède et de l'instrument utilisé. En suivant le texte, ils retrouvent le résultat attribué à Ératosthène et l'on discute avec

FIGURE 2.7 – Un exemple prototypique de dessin d'élève à qui l'on demande d'expliquer pourquoi un gnomons situé à Alexandrie projette une ombre alors que celui de Syène n'en projette pas (MERLE 2002; FARGES et al. 2002; DUCOURANT 2007).



eux des sources d'incertitudes possibles.

4. Enfin, le passage à la limite et le quasi-parallélisme de deux rayons provenant d'un point éloigné est un savoir explicitement travaillé (à la fois expérimentalement, en réalisant l'expérience consistant à attacher deux fils longs de plusieurs mètres tendus à un même clou et à en observer les extrémités quasi-parallèles et mathématiquement, en partant de la propriété de la somme des angles dans un triangle dont l'angle au sommet tend vers 0).

2.5 Discussion

A la suite de ces quelques analyses et de la présentation de ce modèle de reconstruction didactique illustré par un exemple, il nous paraît important de souligner qu'une tension peut apparaître entre la préservation de l'historicité et le travail conceptuel.

Un premier exemple de cette tension nous est fourni par l'exemple du récit de Cléomède. En effet, dans ce récit (et contrairement à ce que presque tous les manuels que nous avons consultés affirment plus ou moins explicitement), le parallélisme des rayons du Soleil n'est pas directement lié à son éloignement. Cléomède postule au contraire (cf Annexe A) : « en troisième lieu, que les rayons émis par différentes parties du Soleil sur différentes parties de la Terre sont parallèles, ce que les géomètres prennent pour hypothèse ». Autrement dit, et bien qu'il soit évidemment difficile de reconstituer précisément sa pensée, on peut supposer que pour Cléomède le Soleil n'est pas un ensemble de points d'où émanent un ensemble de cônes lumineux contenant un ensemble de rayons, mais un ensemble de points envoyant chacun un rayon unique. Autrement dit, Cléomède semble considérer le Soleil comme une source étendue envoyant un faisceau de rayons parallèles entre eux en direction de la Terre, ce qui diffère sensiblement de la manière moderne de présenter la situation. Même si au sens strict deux rayons arrivant parfaitement parallèles à Syène et à Alexandrie proviennent forcément de deux points différents à la surface du Soleil, ce qu'on sous-entend en général aujourd'hui par « parallélisme des rayons » c'est le quasi-parallélisme des deux cônes lumineux provenant de l'ensemble du Soleil entre eux, lié à l'importance de la distance Terre-Soleil au regard de la distance Syène-Alexandrie. Le travail de l'enseignant est ici bien délicat : s'il veut préserver l'intégrité du raisonnement historique, il devra engager ses élèves sur un chemin un peu différent de celui qu'il aurait emprunté pour les accoutumer à l'idée moderne que deux rayons lumineux provenant d'une même source éloignée sont quasi-parallèles.

Un autre exemple de cette même tension nous est apparu au cours de l'encadrement de la thèse de Charlotte de Varent, qui s'est intéressée aux procédures de calculs de surface en Mésopotamie (VARENT 2018). Historiquement, ces procédures ont progressivement reposé sur un double système de nombres : des nombres servant à la mesure des longueurs et des nombres intermédiaires, en système sexagésimal, servant au calcul multiplicatif. Plusieurs approches existent au sujet de ces nombres intermédiaires, mais Christine Proust propose de considérer ces nombres intermédiaires comme des nombres en "virgule flottante", dont l'ordre de grandeur n'est pas représenté dans l'écriture cunéiforme du système SP (cf par exemple PROUST 2007, p. 12). De tels nombres ne sont de nos jours plus utilisés et il est bien difficile de les appréhender conceptuellement. Certaines activités qui sont parfois proposées à l'école et qui reposent sur l'analogie avec le système horaire (h :min :s) sont de ce point de vue assez pauvres et ne permettent pas (à elles seules) de rendre compte de la richesse et de l'inventivité du calcul mathématique qui régnait à Nippur.

Notre but n'est pas ici de multiplier les exemples. Un autre d'entre eux pourrait être fourni par les travaux d'Helmy Chekir, qui a étudié au cours de sa thèse, co-encadrée avec Cécile de Hosson et Olivier Darrigol, l'histoire du concept d'entropie, un concept ayant également varié au cours des évolutions de la thermodynamique. Nous pourrions aussi évoquer l'exemple plus connu, du concept de chaleur... Ce que nous voulons souligner, c'est qu'un concept n'a de sens qu'au sein d'une théorie physique, et que ces théories physiques ne sont pas réductibles les unes aux autres (KUHN 1972). C'est un élément important à garder à l'esprit lors de reconstructions didactiques.

Chapitre 3

Le développement de l'attitude critique

Dans ce nouveau chapitre, indépendant du précédent, nous allons exposer notre deuxième thème de recherche. Nous partirons de notre première étude, sur le principe de la datation au carbone 14 et nous développerons progressivement notre propos sur l'attitude critique des enseignants que nous avons interrogés au cours de cette étude et des suivantes. Cette démarche, outre son intérêt didactique, est également celle que nous avons suivie au cours de nos recherches.

3.1 Le principe de la datation au carbone 14 : des explications bien souvent incomplètes

Partons d'un exemple d'explication au sujet du principe de la datation au carbone 14, un thème récemment revenu dans le programme de l'enseignement scientifique en première. Voici un extrait de l'explication que l'on trouve dans le manuel Didier (CAPITAN et al. 2019, p. 18) au sujet de cette datation :

« Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone. Sa demi-vie, temps au bout duquel la moitié de ces noyaux s'est désintégrée en azote 14, est de 5 730 ans. Se formant dans la haute atmosphère de la Terre, il existe 1 atome de carbone 14 pour 1 000 milliards de carbone 12 (isotope non radioactif). Comme tout isotope du carbone, le carbone 14 se combine avec l'oxygène de notre atmosphère pour former alors du CO_2 (dioxyde de carbone). Ce CO_2 est assimilé par les organismes vivants tout au long de leur

vie : photosynthèse, alimentation, etc. En mourant, ils n'en assimilent plus. La quantité de carbone 14 assimilée diminue alors au cours du temps, de façon exponentielle tandis que celle de carbone 12 reste constante. La datation repose sur la comparaison du rapport entre les quantités de carbone 12 et de carbone 14 contenues dans un échantillon avec celui d'un échantillon standard de référence. On déduit de cette comparaison « l'âge carbone 14 » de l'échantillon qu'on cherche à dater. Cet « âge carbone 14 » est ensuite traduit en âge réel (ou « âge calendaire »), en le comparant à une courbe-étalon, réalisée par les chercheurs à force de nombreuses mesures complémentaires. On peut ainsi en déduire l'âge de l'objet étudié et remonter jusqu'à 50 000 ans environ (au-delà, la technique n'est pas assez précise). » *Source : cea.fr*

Si cette explication ne présente pas d'erreurs flagrantes, elle est en revanche incomplète. En effet, pour mesurer un temps à partir d'un processus de désintégration radioactive du type $P(t) = P_0 \exp(-t/\tau)$ il faut à la fois être capable de mesurer $P(t)$ (proportion d'atomes de carbone 14 actuels), connaître la constante de temps τ (reliée au temps de demi-vie) mais aussi connaître P_0 : la proportion de carbone 14 initial. A cet égard, l'évocation par le texte d'un « échantillon standard de référence » paraît assez mystérieuse. Si le carbone 14 ne cesse de se désintégrer, quelle peut être cette référence ? Quant à la précision que le carbone 14 (comme le carbone 12) est assimilé tout au long de la vie de l'organisme étudié, elle ne résout pas vraiment ce mystère...

D'autres extraits de manuels sont un peu moins incomplets à cet égard. On apprendra par exemple dans le Bordas (ANDRÉ et al. 2019, p. 21) que :

la proportion [de carbone 14] est à peu près constante dans l'atmosphère.

Cette précision, loin d'être anecdotique, rend compréhensible le principe de datation : P_0 correspond à cette proportion de carbone 14 atmosphérique et ne varie pas dans le temps. Mais une autre question surgit alors : pourquoi cette proportion est-elle constante ? Alors que le carbone 14 se désintègre dans la matière organique, faut-il envisager qu'il ne se désintégrerait pas dans l'atmosphère ? Tout physicien sait que cette hypothèse est absurde, mais on ne peut totalement exclure que certains élèves en fassent l'hypothèse en cherchant à compléter d'eux-même cette explication qui reste fragmentaire.

D'autres textes améliorent encore l'explication. Ainsi le Hachette (BONNEAU et al. 2019, p. 25) ajoute :

Le carbone 14 est continuellement produit dans la haute atmosphère grâce à des réactions nucléaires entre les noyaux des atomes d'azote

stables ^{14}N de l'air et des neutrons d'origine cosmique. Ces réactions maintiennent une teneur constante en ^{14}C dans l'atmosphère, mais cette quantité est très faible.

Cette fois, l'explication est nettement plus cohérente : le ^{14}C se désintègre partout (dans la matière organique et dans l'atmosphère), mais alors qu'il n'y a pas de création de ^{14}C dans la matière organique, celui-ci est produit dans l'atmosphère de manière à ce que son taux soit constant. On peut cependant encore s'interroger sur cette dernière précision. Pourquoi y a-t-il autant de créations que de désintégrations de ^{14}C dans l'atmosphère ? S'agirait-il d'un hasard ?

Ce dernier élément explicatif est beaucoup plus rarement abordé. Parmi les manuels consultés, seul le Belin (BEAU et al. 2019, p. 20) indique, de manière assez elliptique :

Un équilibre entre formation et désintégration du ^{14}C s'établit ainsi...

Certes, en l'absence d'une étude des équations différentielles, la justification qu'on doit aboutir à un régime permanent peut sembler, a priori, moins évidente à aborder en première. Un modèle analogique simple pourrait cependant être avancé (tel que celui que nous avons fourni dans DÉCAMP et VIENNOT 2015). Ce modèle met en avant deux aspects fondamentaux du problème : d'une part le fait que le nombre total d'atomes de ^{14}C et de ^{14}N est constant puisque les deux principaux mécanismes de production et de désintégration du ^{14}C correspondent à des échanges entre ces deux populations et d'autre part le caractère « multiplicatif » des taux de désintégrations et de production du ^{14}C qui permet *in fine* la régulation. Quel que soit le modèle envisagé, il est sans doute révélateur que ces justifications soient absentes de toutes les explications que nous avons pu trouver au sujet de la datation au carbone 14. L'article Wikipedia (*Datation par le carbone 14* 2020) se contente par exemple d'indiquer :

De plus, on suppose que le flux de rayons cosmiques est constant sur une longue période de temps (première approximation). Par conséquent, le taux de production du radiocarbone est constant, donc le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{total}}$ dans l'atmosphère, la surface des océans et la biosphère est constant (le nombre d'atomes produits égale le nombre d'atomes qui se désintègrent).

Or pour un lecteur ne connaissant pas le sujet, il n'est pas évident qu'un taux de production de ^{14}C constant implique forcément à terme une évolution vers un taux de production égal au taux de désintégration...

3.2 Contexte et cadre d'analyse

Quoiqu'il en soit, cet exemple nous permet de dégager quelques unes des caractéristiques de l'analyse critique, et de préciser le cadre dans lequel nous nous inscrivons. En premier lieu, nous nous intéressons à l'analyse critique **en physique**. C'est une première limitation importante. De nombreuses voix se sont élevées pour une intégration plus importante de l'apprentissage de la « pensée critique » dans les programmes scolaires (cf. par exemple HAZELKORN et al. 2015 ; WORLD BANK 2018 ; BOON NG 2019). Les programmes français n'échappent pas à la règle. En 2011 déjà, le programme de terminale de physique-chimie (MEN 2011) , tout en invitant à de nombreuses reprises à « extraire et exploiter les informations » de différents documents, précisait :

Les activités proposées aux élèves au sujet de la compétence « extraire » et leurs connaissances acquises doivent les conduire à s'interroger de manière critique sur la valeur scientifique des informations, sur la pertinence de leur prise en compte, et à choisir de façon argumentée ce qui est à retenir dans des ensembles où l'information est souvent surabondante et parfois erronée, où la connaissance objective et rationnelle doit être distinguée de l'opinion et de la croyance.

Dans les programmes actuels de physique-chimie (MEN 2019b ; MEN 2019d ; MEN 2019c), la capacité « faire preuve d'esprit critique » (associée à la compétence « Valider ») est l'une des nombreuses capacités associées à « la démarche scientifique » en 2nde, 1re et terminale. Celle-ci est encore plus mise en valeur dans les programmes de l'enseignement scientifique (MEN 2019e ; MEN 2019f) qui affichent que l'un des trois buts de cet enseignement est de :

contribuer au développement en chaque élève d'un esprit rationnel, autonome et éclairé, capable d'exercer une analyse critique face aux fausses informations et aux rumeurs.

Du point de vue de la recherche, une controverse existe. Certains auteurs insistent en effet sur le côté transversal des compétences liées à la pensée critique (DAVIES 2013 ; ENNIS 1996 ; HALPERN 1998) alors que d'autres font valoir l'importance d'une analyse critique spécifique à chaque domaine d'étude (BARROW 1991 ; McPECK 1990 ; McPECK 2017 ; WILLINGHAM 2007). Selon ce dernier, « la pensée critique n'est pas un ensemble de compétences qui peuvent être déployées à tout moment, dans n'importe quel contexte¹. » En l'absence de consensus, nous nous sommes donc prudemment cantonnés à

1. Critical thinking is not a set of skills that can be deployed at any time, in any context. (WILLINGHAM 2007, p. 10)

l'étude de l'attitude critique dans le domaine que nous connaissons : la physique. De ce fait, nous avons laissé de côté les définitions très générales des psychologues sur la pensée critique et nous nous sommes limités à la capacité de détecter dans des explications physiques des déclarations auto-contradictaires, des déclarations qui contredisent les lois fondamentales de la physique et les explications très incomplètes (comme celles proposées plus haut au sujet du ^{14}C), cette liste étant bien sûr elle-même à compléter (cf ci-dessous).

Dans le même esprit, ajoutons à cela que nous avons aussi volontairement évité les questions socioscientifiques et que nous avons cherché à nous tenir à l'écart de celles relevant de l'expertise biaisée, des influences politiques ou religieuses, voire de celles liées à des théories complotistes. Ces questions sont bien sûr cruciales mais elles mélangent de nombreux aspects, ce que nous avons plutôt cherché à éviter dans un premier temps. Nous ne nous intéresserons donc pas à la capacité à critiquer les sources des textes considérés, le statut des experts ou d'autres capacités comme celles énumérées par JIMÉNEZ-ALEIXANDRE et PUIG 2012. L'exemple présenté en introduction sur le carbone 14 se voulait « neutre » et a du moins été présenté en l'absence de tout contexte particulier.

Un autre aspect important de notre série d'étude (visible également dans l'exemple du carbone 14) est que nous nous avons volontairement concentré nos efforts sur l'analyse critique de documents explicatifs écrits. Si les facultés expérimentales et rationnelles sont conjointement mises en avant par les philosophes depuis longtemps (cf par exemple BACON 1620, p. I,95), l'expérience a eu longtemps un poids particulièrement important dans l'enseignement de la physique en France. Les invitations, évoquées plus haut, à « extraire et exploiter l'information » contenue dans des documents écrits, sont assez récentes dans les programmes de notre discipline et l'analyse critique de ces documents est encore balbutiante. De même ce qui a beaucoup été mis en avant dans la littérature de recherche en didactique de la physique, c'est l'importance pour les élèves en science de critiquer leur propre raisonnement, ou celui exprimé lors d'une discussion, en mettant l'accent sur ce qui peut être conclu à partir d'expériences (SHARMA et al. 2014; LEVRINI et al. 2017; ETKINA et PLANINŠIČ 2015). Jusqu'ici la situation consistant à proposer à un individu de critiquer un document conçu par un expert du domaine et dont le but est d'expliquer quelque chose a été moins étudiée (H.-Y. CHANG et H.-C. CHANG 2013).

3.3 Méthodologie

Pour détailler la méthodologie que nous avons suivie au cours de nos recherches, reprenons un instant l'exemple des explications sur le ^{14}C . Pour conduire nos investigations nous avons choisi un public de professeurs stagiaires (M2 MEEF actuels). Le fait qu'ils aient tous obtenu le CAPES permettait de garantir un niveau minimum en physique et de supposer qu'ils avaient reçus au cours de leur formation quelques notions sur la radioactivité. Par ailleurs, il nous semblait particulièrement intéressant de cibler ces professeurs car ils allaient eux-mêmes être amenés à travailler à partir de documents avec leurs futurs élèves. Documenter leur propre attitude critique nous semblait donc important avant d'envisager d'étudier la manière dont ils s'empareraient de cette question avec leurs élèves.

Nous avons mené des entretiens semi-directifs assez longs (environ 1h) avec ces professeurs stagiaires en leur soumettant une série de 5 textes (notés T_1 à T_5 dans la suite) trouvés sur internet ou dans des ouvrages de vulgarisation ainsi qu'une explication finale que nous avons nous-même fournie (T_6 dans la suite). Partant d'explications très incomplètes (T_1), nous avons progressivement présenté aux professeurs interrogés des explications de moins en moins incomplètes, jusqu'à l'étape 6 au cours de laquelle nous leur avons présenté l'analogie déjà évoquée précédemment (DÉCAMP et VIENNOT 2015).

Le tableau 3.1 permet de prendre connaissance des principaux éléments explicatifs présents dans les textes et le tableau 3.2 présente les principales étapes de l'entretien.

Afin de suivre leur dynamique intellectuelle, nous avons cherché à caractériser à la fois les aspects conceptuels et des aspects que nous avons qualifiés de « méta-cognitifs-affectifs » (mca). Nous ne détaillerons pas ici les aspects conceptuels, car ils ne constituaient pas l'objectif premier de cette recherche mais nous avons retrouvé des difficultés connues (notamment sur les aspects multiplicatifs et sur la difficulté à envisager le passage de l'état transitoire à l'état stationnaire) et nous avons également débusqué quelques erreurs inattendues, comme le fait qu'une majorité des professeurs stagiaires interrogés semblait penser que le produit de désintégration du ^{14}C était le ^{12}C . Cette erreur s'explique sans doute par une confusion entre le domaine de la chimie et celui de la radioactivité (les équations s'écrivent de manière similaire et on ne sait pas toujours si les symboles font référence aux substances chimiques, aux atomes ou à leurs noyaux) ainsi que par la comparaison des deux isotopes du carbone en termes de stabilité.

Du point de vue des aspects qualifiés de « méta-cognitifs-affectifs » (mca), nous avons relevé les cas où les professeurs interrogés exprimaient leur satisfaction d'avoir des informations complémentaires sur un sujet (m+), ou

TABLE 3.1 – Éléments explicatifs introduits successivement dans les différents textes (T_1 à T_6). X : Ces arguments sont introduits explicitement. x : un indice est fourni de manière moins explicite. χ : l'argument n'est pas mentionné dans le texte mais est fourni par l'interviewer si l'interviewé l'ignore.

Éléments explicatifs	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Décroissance du ^{14}C après la mort ; loi connue	X					
Processus de création : $n + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C} + p$	X					
Besoin de connaître N_0 au moment de la mort		x				
$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ uniforme dans l'atmosphère		X				
Loi de décroissance exponentielle		X				
$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ constant dans le temps		X	X			
Taux de création ($d^{14}\text{C}/dt$) constant			X			
$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$			χ			
Taux de désintégration et de création égaux				X		
Taux égaux $\rightarrow$ état stationnaire					X	
Régime transitoire, ajustement					x	X
Somme de N et ^{14}C constante						X
Taux de décroissance $d^{14}\text{C}/dt \propto N_0$.						X
Adaptation grâce au facteur N_0						X

TABLE 3.2 – Principales étapes de l'entretien sur le ^{14}C

Phase	Questions posées	Principaux aspects de la discussion (prévus ou attendus)
$E_1 (T_1)$	Présentation du problème : qu'est-ce qui justifie le principe de datation au ^{14}C ? Avez-vous entendu parler du ^{14}C ? Lisez T_1 . Que pensez-vous du texte? Ces explications vous suffisent-elles? Avez-vous besoin de compléments d'information?	Les interviewés s'approprient le problème et se souviennent de ce qu'ils ont appris. Première observation de leurs réactions. L'interviewer est attentif aux arguments apportés. Faible apport de l'interviewer
$E_2 (T_2)$	Lisez T_2 ... Que pensez-vous du texte? Avez-vous besoin de plus?	Idem ↑
$E_3 (T_3)$	Lisez T_3 ... Idem ↑	Idem ↑
$E_4 (T_4)$	Lisez T_4 ... Idem ↑	Idem ↑ + une question (si elle n'est pas apparue avant) : « taux égaux : un hasard? »
$E_5 (T_5)$	Lisez T_5 ... Idem ↑	Idem ↑
$E_6 (T_6)$	Lisez T_6 ... Idem ↑	L'interviewer est attentif aux arguments des interviewés, à leur réactions et questions. Fort apport de l'interviewer.
$E_7 (\text{fin})$	Évaluation globale de l'entretien	Impressions ressenties

TABLE 3.3 – Degré d'accord à l'issue de chaque étape et type de questions posées. Abréviations utilisées : Θ ou $\simeq$: accord ou accord partiel ; dl : question à propos d'un détail ; cq : question cruciale (et cellule grisée) ; dernière colonne : échelle de Likert de 1 (déception) à 4 (enthousiasme) à l'issue de l'entretien.

Professeur	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
G	$\simeq$ dl	$\simeq$ cq	cq ²	cq	cq	Θ	3
B	Θ	Θ cq	cq ³	cq	cq ³	Θ	4
S	$\simeq$ dl	$\simeq$ dl ³	$\simeq$	cq ²		Θ	3
J	Θ	Θ	Θ dl ²	cq ²	cq	Θ	3
M	Θ	Θ	Θ	dl cq	cq	Θ	3
T	$\simeq$ dl	$\simeq$ dl	Θ	cq	$\simeq$	Θ	2
A	$\simeq$	Θ	Θ		cq	Θ	2,5
V	Θ	Θ	Θ dl	$\simeq$	cq ²	Θ	3
Y	$\simeq$ dl	Θ dl	Θ	Θ	Θ	Θ	4
H	Θ	$\simeq$ dl	Θ dl ²	Θ	(Θ)	Θ	4

au contraire leur frustration (m-) car les explications leur semblaient insuffisantes. Nous avons également estimé le degré de leur accord éventuel à l'issue de la discussion sur chacun des textes, total (Θ) ou mitigé ($\simeq$). Enfin avons noté les questions posées par les interviewés, questions qui pouvaient concerner un détail (dl) ou au contraire un point crucial (cq) dans l'explication.

3.4 Premiers résultats

Les résultats concernant les aspects « méta-cognitifs-affectifs » observés au cours de cette première étude sur le principe de datation au carbone 14 sont détaillés dans les tableaux 3.3 et 3.4. L'évolution typique est la suivante : dans la première partie de l'entretien, les questions posées par les professeurs interrogés portent essentiellement sur des points de détails, et le sentiment dominant est plutôt une acceptation (totale ou plus mitigée) des explications, malgré leur caractère très incomplet. Quand l'acceptation est plus mitigée, les interviewés posent parfois des questions que nous ne considérons pas cruciales (comme le type de détecteur utilisé, ou des détails mathématiques). Ils expriment pour la plupart de la satisfaction lors de l'apport de nouvelles informations sans pour autant exprimer une réelle critique sur les explications antérieures. Puis, au-delà d'un certain seuil, les interviewés ne posent plus que des questions cruciales, n'expriment plus de sentiment d'acceptation et

TABLE 3.4 – Degré d'accord à l'issue de chaque étape et expressions de satisfaction ou de frustration. Abréviations utilisées : Θ ou $\simeq$: accord ou accord partiel ; m- : frustration ; m+ : satisfaction ; dernière colonne : échelle de Likert de 1 (déception) à 4 (enthousiasme) à l'issue de l'entretien.

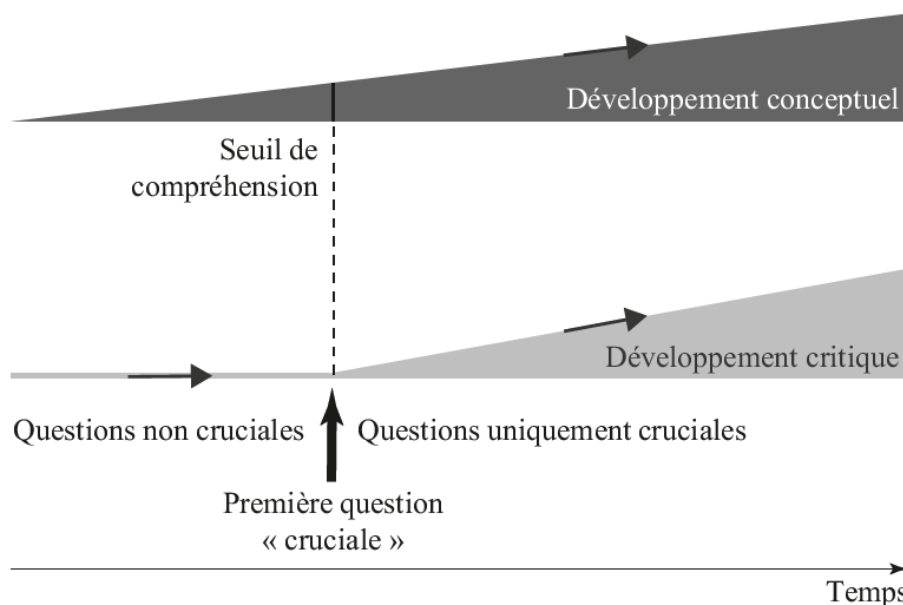
Professeur	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
G	$\simeq$	$\simeq$ m-	m-	m-	m- ²	Θ m+	3
B	Θ	Θ m+	m+ m- ²	m-	m-	Θ m+	4
S	$\simeq$	$\simeq$	$\simeq$	m-	m-	Θ m+	3
J	Θ	Θ m+	Θ	m-	m-	Θ m+	3
M	Θ	Θ m+	Θ	m-	m-	Θ m+	3
T	$\simeq$ m-	$\simeq$ m-	Θ		$\simeq$ m-	Θ m+	2
A	$\simeq$	Θ m+	Θ m+ ²	m-	m-	Θ m+	2,5
V	Θ	Θ	Θ	$\simeq$	m-	Θ	3
Y	$\simeq$	Θ m+	Θ m+	Θ	Θ	Θ m+	4
H	Θ	$\simeq$	Θ	Θ	(Θ)	Θ	4

se montrent frustrés face aux explications fournies.

Cette évolution majoritaire au cours de l'entretien suggère qu'à un moment de la discussion, les interviewés s'approprient le problème, prennent conscience qu'une explication plus complète est nécessaire et prennent de la distance vis à vis des textes proposés (notons que ce moment diffère selon les interviewés). L'entretien étant construit autour d'un apport régulier d'information, l'évolution observée nous a amené à proposer l'idée que, pour la plupart des professeurs interrogés, il fallait qu'ils aient atteint un certain seuil de compréhension conceptuelle avant qu'ils fassent preuve d'attitude critique. En ce sens, il nous semble que l'on peut évoquer un co-développement de la compréhension conceptuelle et de l'attitude critique et nous avons appelé ce type d'évolution (le plus courant) : la « critique différée » à cause du seuil qu'il faut atteindre avant qu'elle ne se déclenche. La figure 3.1 illustre ce modèle.

Deux professeurs seulement (Y et H) sur les 10 professeurs interrogés ne suivent pas ce schéma général. Ils restent passif du point de vue de la critique du début à la fin de l'entretien. Ces deux professeurs font également preuve d'une connaissance plus avancée du sujet dès le début de l'entretien et ne posent aucune question critique, comme s'ils connaissaient déjà les réponses à ces questions. Dans leur cas, tout se passe comme si ils complétaient ou corrigeaient d'eux-mêmes les textes qui leur sont présentés. Nous avons qualifié ce schéma d'« anesthésie experte » et avons supposé qu'une personne ayant une certaine expertise d'un sujet donné pouvait fort bien ne pas s'apercevoir

FIGURE 3.1 – Modèle du schéma intellectuel observé majoritairement lors des entretiens à propos de la datation au carbone 14 : la « critique différée »



des problèmes que les explications proposées pouvaient poser à quelqu'un de moins avancé sur le même sujet, ou, du moins, ne pas réagir (puisque c'est la seule observable à laquelle nous avons accès).

3.5 Généralisation et catégorisation

À la suite de cette première étude, nous avons cherché à savoir si les résultats obtenus étaient généralisables et nous avons mené une série d'études sur d'autres thèmes de physique. La première de ces études concernait la couverture de survie (VIENNOT et DÉCAMP 2016a), la seconde l'osmose (VIENNOT et DÉCAMP 2016b) et la troisième la capillarité (VIENNOT et DÉCAMP 2018b). À chaque fois ces recherches ont demandé une étude approfondie du contenu physique.

En ce qui concerne la couverture de survie, il s'agissait d'interroger les explications usuelles qui invitent les utilisateurs de ces couvertures à les placer en mettant la face dorée à l'extérieur et la face argentée à l'intérieur. Cette injonction est généralement justifiée par le fait que le côté argenté est plus réfléchissant que le côté doré et qu'il doit donc être mis à l'intérieur afin de « réfléchir la chaleur » vers le corps de l'utilisateur (*Couverture de sur-*

vie 2020). L'explication courante fait en revanche le plus souvent l'impasse sur ce qui se passe du côté extérieur de la couverture : si le côté doré est moins réfléchissant, il est par voie de conséquence plus émetteur et l'on peut alors se demander s'il est bien pertinent de le mettre du côté extérieur... En regardant l'ensemble des échanges de manière globale, on se trouve en fait face à un dilemme qu'il est impossible de résoudre en considérant uniquement les échanges par rayonnement (VIENNOT et DÉCAMP 2016a). Nous avons mené 7 entretiens sur ce thème et retrouvé dans 6 cas sur 7 le schéma observé majoritairement lors de l'étude précédente sur le ^{14}C , à savoir une « critique différée ». Ce retard à la critique est peut-être ici renforcé par le fait que l'explication habituelle suit une conception répertoriée de longue date : le raisonnement linéaire causal. Cependant, nous avons observé pour la première fois au cours de ces entretiens, chez l'une des participantes, une critique précoce : cette enseignante en considérant l'ensemble du processus, a dès le début affirmé avoir un problème avec l'explication fournie, et ce, alors même que sa connaissance des échanges thermiques était faible. Elle nous a ainsi permis de confirmer que ce schéma intellectuel était également possible.

Nous ne détaillerons pas ici les études menées sur le cas de l'osmose ou celui de la capillarité. Dans le cas de l'osmose, nous avons retrouvé le fait que la « critique différée » était le schéma majoritaire et avons à nouveau observé un seul cas de « critique précoce » (VIENNOT et DÉCAMP 2016b). Dans le cas de la capillarité, quatre éléments explicatifs (C_1 à C_4) présents dans les documents fournis au cours de l'entretien étaient critiquables (pour plus de détails, cf VIENNOT et DÉCAMP 2018b). Les résultats de cette étude sont apparus un peu plus dispersés selon les éléments explicatifs, mais à nouveau nous avons à nouveau majoritairement retrouvé des « critiques différées » et peu des professeurs interrogés exprimaient à la fin de l'entretien les quatre critiques attendues. En outre, les critiques étaient pour la plupart formulées de façon atténuée et en suivant de manière plus précise la dynamique intellectuelle des professeurs interrogés, nous avons observé de nombreux aller-retours dans la critique, ce que nous avons qualifié de « critique instable ».

Les différentes catégories utilisées lors de ces premières études sur l'évolution de l'attitude critique sont récapitulées dans le tableau 3.5 et le tableau 3.6 résume quant à lui les fréquences observées de ces dynamiques intellectuelles pour les différents sujets abordés (voir également VIENNOT et DÉCAMP 2018a).

TABLE 3.5 – Catégories utilisées pour décrire les différentes dynamiques intellectuelles lors des entretiens.

Critique différée	Lorsqu'un individu ne se montre pas critique avant d'avoir atteint un certain seuil de compréhension conceptuelle, variable et allant au-delà de la simple nécessité logique
Critique précoce	Lorsqu'un individu adopte rapidement une attitude critique, malgré une compréhension incomplète du thème étudié
Anesthésie experte	Lorsqu'un individu connaît très bien le thème étudié mais ne se montre pas critique face à des textes incohérents ou incomplets sur le thème en question
Stabilité ou instabilité critique	Absence ou présence d'aller-retours critiques sur un élément explicatif donné

TABLE 3.6 – Fréquence des différentes dynamiques intellectuelles observées au cours de 4 études avec des professeurs stagiaires (dans le cas de la capillarité, les différents éléments critiquables C_1 à C_4 sont spécifiés).

<i>Thème</i>	Élément explicatif critiquable	Effectif	Critique précoce	Critique différée ou instable	Anesthésie experte
<i>Datation au ^{14}C</i>	taux constant de $^{14}C/^{12}C$ dans l'atmosphère	10	0	8	2
<i>Couverture de survie</i>	face dorée à l'intérieur pour se protéger du froid	8	1	7	0
<i>Osmose</i>	concentration identique dans les deux branches d'un tube en U à l'équilibre osmotique	5	1	4	0
<i>Capillarité</i>	C_1 : schéma de forces non équilibré	11	6	5	0
<i>Capillarité</i>	C_2 : forces agissant sur une ligne immatérielle	11	1	10	0
<i>Capillarité</i>	C_3 : sustentation de la colonne inexplicquée	11	5	5	1
<i>Capillarité</i>	C_4 : la paroi en verre ne peut "tirer" le liquide vers le haut	11	5	6	0

Chapitre 4

Quelques perspectives

4.1 Poursuite des recherches sur l'utilisation de l'histoire des sciences

Si l'histoire des sciences a régulièrement été citée dans les préambules des programmes de physique-chimie de ces dernières années, sa place restait celle d'un complément du cours traditionnel et de l'ensemble des connaissances listées thématiquement par le bulletin officiel. « Un saupoudrage, une cerise [...] sur le gâteau d'enseignement » pour reprendre l'expression de GUEDJ et DUSSEAU 1999. À l'occasion de la dernière réforme du lycée, une étape importante nous semble avoir été franchie, du moins dans l'affichage institutionnel. En effet, le programme de l'enseignement scientifique (MEN 2019e ; MEN 2019f) se démarque sensiblement des programmes précédent en ce qu'il ne « vise pas à construire un savoir encyclopédique » mais se fixe des objectifs généraux de formation qu'on pourrait en grande partie qualifier d'épistémologiques. Trois idées principales sont en effet au centre de ce programme :

- Comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration
- Identifier et mettre en oeuvre des pratiques scientifiques
- Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement

L'histoire des sciences y est évoquée à de nombreuses reprises et le paragraphe suivant lui est spécifiquement attribuée :

Une place importante pour l'histoire raisonnée des sciences

L'une des manières de comprendre comment se construit le savoir scientifique est de retracer le cheminement effectif de sa construc-

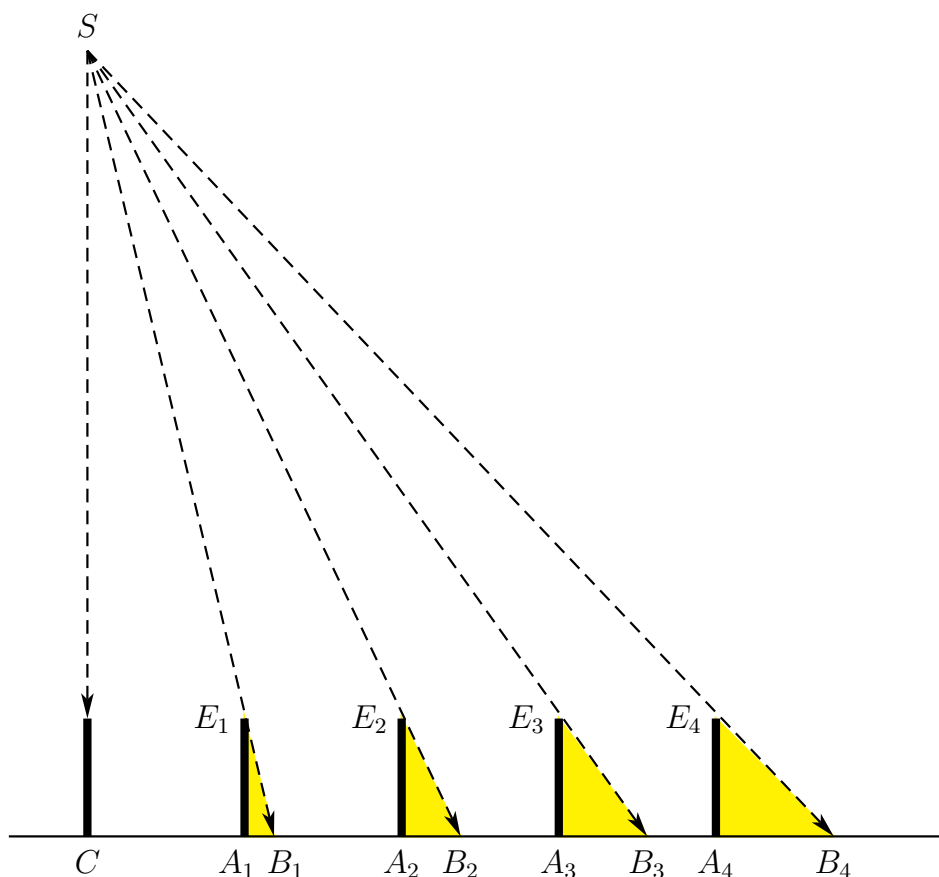
tion au cours de l'histoire des sciences. Il ne s'agit pas de donner à l'élève l'illusion qu'il trouve en quelques minutes ce qui a demandé le travail de nombreuses générations de chercheurs, mais plutôt, en se focalisant sur un petit nombre d'étapes bien choisies de l'histoire des sciences, de faire 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.

Si l'angle choisi par ce nouveau programme est plutôt l'utilisation de l'histoire des sciences à des fins de constructions de connaissances épistémologiques, et s'il n'est pas facile de se fixer simultanément des objectifs de construction de connaissances conceptuelles et épistémologiques, il n'y a pas pour autant d'opposition ou de contradiction entre ces deux aspects.

A titre d'exemple nous pouvons ici mentionner le travail que nous avons effectué au sujet du modèle cosmologique des Zhou (HOSSON et DÉCAMP 2014; DÉCAMP et HOSSON 2018). En effet, dans le prolongement du travail sur Ératosthène détaillé dans le chapitre 2, nous avons mené des investigations pour rechercher des modèles cosmologiques qui, dans l'histoire, pouvaient faire écho aux idées initiales des élèves : la représentation de la lumière du Soleil sous la forme de rayons divergents. Ces investigations nous ont amené à nous intéresser au modèle cosmologique des Zhou dont on peut trouver traces dans deux sources concordantes : le *Zhou Bi* (CULLEN 2007) et le *Chin Shu* (HO 1967). Les deux textes correspondants sont reproduits en Annexe B.

Dans ces deux textes, le Soleil peut être considéré comme une source ponctuelle, émettant des rayons divergents venant frapper différents gnomons verticaux, situés en des points alignés et régulièrement espacés à la surface d'une Terre plate (le long d'une droite orientée Nord/Sud). La figure 4.1 (qui n'est présente dans aucun des deux textes historiques) propose un modèle représentant la situation évoquée dans le premier extrait proposé. Le soleil (S) considéré comme ponctuel envoie des rayons divergents vers les sommets E_i des différents gnomons A_iE_i . Ces gnomons sont disposés en des points A_i régulièrement espacés ($A_iA_{i+1} = 1000$ li). L'ombre A_iB_i des gnomons augmente régulièrement ($A_{i+1}B_{i+1} - A_iB_i = 1$ cun). L'ombre du gnomon de Yangcheng valant 15 cun on en déduit que Yangcheng est situé au point A_{15} et que la distance entre Yangcheng et le point (C) à la verticale du Soleil vaut 15 000 li. Enfin, la taille d'un gnomon valant $E_iA_i = 8$ chi = 80 cun, la distance SC vaut donc 80 000 li (auxquels il faut ajouter 8 chi, hauteur du

FIGURE 4.1 – Figure représentant le modèle cosmologique des Zhou »



gnomon, qu'on considère comme négligeables).

Nous avons utilisé ces textes chinois et le texte de Cléomède en formation d'enseignants. Comme nous l'avons discuté dans DÉCAMP et HOSSON 2018, si les textes chinois permettent de rebondir sur le modèle conceptuel spontanément envisagé par certains enseignants, la confrontation entre ces textes et le texte de Cléomède permet également une discussion épistémologique intéressante. Sans entrer dans les détails, on notera que cette confrontation conduit assez naturellement à discuter de la notion de modèle, et en particulier de montrer que des observations similaires peuvent conduire à des mesures très différentes selon le modèle adopté (TREINER 2002) et que deux observations uniques ne permettraient pas de discriminer entre les deux modèles¹.

1. il existe en réalité une infinité de modèles compatibles avec deux observations

TABLE 4.1 – Quelques caractéristiques de l’activité scientifique recensées par MAURINES et BEAUFILS 2011.

- L’activité scientifique est le lieu de controverses.
- Les connaissances scientifiques obéissent à des critères de confrontation avec les faits d’observation et d’expérimentation, de cohérence interne, de simplicité et de puissance.
- Un scientifique ne travaille pas seul mais au sein d’une communauté qui contribue au contrôle des savoirs scientifiques construits.
- Il y a une relation forte entre les questions techniques et l’évolution des idées.
- Les connaissances ont évolué au cours du temps (par continuité et ruptures).
- Des difficultés conceptuelles ont été rencontrées à une époque donnée.
- Il y a une interdépendance entre sciences et sociétés.
- Il y a des relations entre sciences et croyances.

Par ailleurs, il est également très intéressant de montrer que le modèle d’une Terre sphérique présenté par Cléomède s’accompagne d’observations réalisées via un cadran solaire hémisphérique alors que le modèle d’une Terre plate des Zhou s’accompagne d’observations réalisées à l’aide d’un cadran solaire plan. On voit ici qu’il existe une réelle dialectique entre mesure et théorie et qu’il n’est pas forcément facile, ni légitime de séparer les deux (ce que BACHELARD 1938 traduit par la formule suivante : « L’instrument de mesure finit toujours par être une théorie et il faut comprendre que le microscope est un prolongement de l’esprit plutôt que de l’œil »).

Comme on le voit sur cet exemple, l’emploi de l’histoire des sciences à des fins conceptuelles ne s’oppose pas à son utilisation pour l’acquisition de connaissances épistémologiques. La caractérisation de ces connaissances épistémologiques et les conditions de leur acquisition par les élèves pourraient être un premier axe de prolongement de nos travaux. À cet égard, il nous semble notable que les éléments épistémologiques cités plus haut ne soient pas tout à fait les mêmes (ils nous paraissent complémentaires) de la liste d’objectifs d’apprentissage de nature épistémologique évoquée par exemple par MAURINES et BEAUFILS 2011 (cf table 4.1).

La manière dont les enseignants s’empareront, en classe, de ces épisodes historiques nous paraît également un objet d’étude intéressant. En effet, si deux objectifs (conceptuels et épistémologiques) sont possibles pour un même

d’ombre en jouant sur le rayon de courbure de la Terre et la distance Terre-Soleil

épisode historique, on ne peut manquer de se demander quelles seront les orientations favorisées par les enseignants et quels paramètres seront susceptibles d'influencer leurs choix.

Nous avons mené récemment une étude sur la manière dont les manuels de l'enseignement scientifique de première s'emparaient de l'épisode historique de la mesure de la Terre (DÉCAMP et HOSSON 2020). L'accent de notre analyse portait surtout sur l'historicité des éléments apportés à cette occasion, historicité très discutable et sur laquelle nous reviendrons au chapitre 4.3 mais nous prévoyons d'ores et déjà d'étudier les tâches proposées dans ces manuels afin d'examiner le type de connaissances susceptibles d'être construites par les élèves au cours de leur résolution.

4.2 Former à l'analyse critique ?

Une autre perspective naturelle de nos travaux de recherche concerne notre deuxième thème d'étude : l'analyse critique. Comme nous l'avons exposé en détail au chapitre 3, l'attitude majoritaire des enseignants face aux textes que nous leur avons proposés consiste en une critique retardée, quand bien même une objection précoce pourrait être formulée. Si certains facteurs psychologiques et affectifs expliquent probablement en partie cette retenue et demanderaient eux-aussi des investigations ultérieures, la recherche associée à la formation à l'analyse critique en physique nous semble une suite logique de ces premiers travaux.

L'étude d'un grand nombre d'explications nous a permis d'ébaucher une liste de critères auquel on peut s'exercer à soumettre un texte explicatif pour le tester. Par « texte », il faut entendre de manière très large toute type de source d'information : phrases, lignes de calcul, images ou schémas. Nous avons distingué deux grands types de critères : les « failles avérées » qui justifient des doutes ou même des refus, et les « facteurs de risque » qui ne peuvent être qualifiés d'erreurs manifestes, mais qui sont susceptibles d'en provoquer. Ces failles avérées et facteurs de risques sont rapidement résumés dans les tables 4.2 et 4.3. Ces listes de « labels » à elles seules ne permettent cependant pas de prendre réellement connaissance des critères auxquels ils correspondent. Pour plus de précision, on en trouvera une description détaillée de ces critères dans VIENNOT et DÉCAMP 2019, chap 2 et 3.

L'explicitation de ces critères et leur illustration en s'exerçant sur différents textes nous paraît être une entrée possible en matière de formation à la critique. Nous avons d'ailleurs commencé à mettre en place de telles formations, à destination de professeurs stagiaires. Documenter et caractériser l'évolution de l'attitude des participants lors de ces formations est une de nos perspec-

TABLE 4.2 – « Failles avérées » justifiant des doutes voire un refus face à un texte physique (VIENNOT et DÉCAMP 2019, chap 2).

- Contradiction interne
- Contradiction directe d'une loi
- Contradiction indirecte d'une loi
- Incomplétude logique
- Généralisation abusive
- Incompatibilité avec une expérience de pensée

TABLE 4.3 – « Facteurs de risques » susceptibles de provoquer des erreurs face à un texte physique(VIENNOT et DÉCAMP 2019, chap 3).

- Exactitude de la conclusion
- Explication-écho
- Désignation non standard des entités
- Tout ou rien
- Petit assimilé à nul
- Une seule cause prise en compte
- Un seul lieu pris en compte
- Explication-récit explicite
- Explication-récit implicite
- Image : réalisme et symbolisme
- Image : similarité de symboles
- Image : hypersélectivité
- Image : structure et échelles
- Analogie/métaphore

tives de recherche à long terme. Pour la mise en place de telles formations, notons que différentes approches sont bien sûr possibles : outre la détection de failles ou de risques dans un (seul) texte donné, une stratégie particulièrement intéressante pourrait consister à proposer de comparer différentes explications physiques d'un même phénomène. Mais avant de s'attaquer à ce sujet de longue haleine, un préalable nous semble être de tester la validité des résultats que nous avons établis au chapitre 3 sur des thèmes scolaires directement enseignés par les professeurs interrogés. En effet, nous nous sommes, dans nos premières études, limités à des thèmes abordables et connus des professeurs interrogés mais non enseignés par ces derniers : osmose, capillarité, transferts thermiques pour le thème de la couverture de survie. Le thème de la datation au carbone 14 était quant à lui également à la limite de ce qui était enseigné au lycée puisque la radioactivité était au programme à l'époque de nos investigations, mais que le contexte spécifique du ^{14}C ne l'était pas et que la décroissance exponentielle était également hors programme (MEN 2010b).

Aborder la question de la critique de sujets explicitement présents dans les programmes du secondaire nous semble crucial au regard de la difficulté à remettre en cause certains « rituels » d'enseignement. Nous avons commencé à effleurer cette question en nous intéressant aux explications parfois données au sujet du sens du courant dans des circuits simples ne comprenant qu'une pile et un récepteur (DÉCAMP et VIENNOT 2018 ; VIENNOT et DÉCAMP 2019). Une explication que l'on trouve régulièrement pour justifier le sens du courant à l'extérieur de la pile est celle que l'on peut par exemple retrouver sur le site internet de l'académie de Bordeaux (FARLOUBEIX 2002) :

La pile et sa force électromotrice :

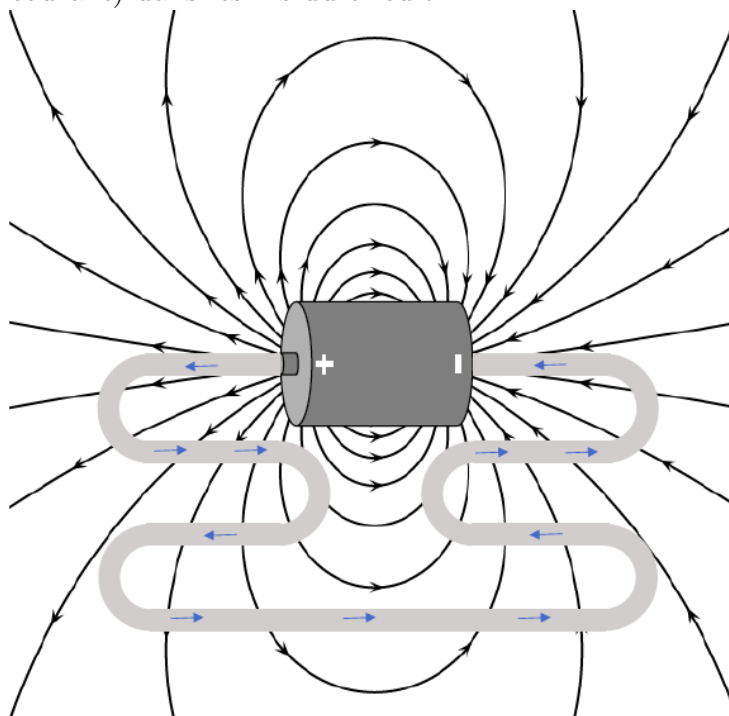
Entre les deux bornes d'une pile existe continuellement une différence de densité des électrons libres : La borne négative possède une concentration d'électrons plus forte que la normale tandis que la borne positive est déficitaire en électrons.

Si un circuit électrique est relié à la pile, les électrons libres du circuit sont attirés par la borne positive, repoussés par la borne négative de la pile. Ils circulent de la borne moins vers la borne plus à l'extérieur du générateur.

La différence de potentiel (ou tension électrique) qui existe ainsi entre les bornes de la pile est encore appelée force électromotrice car elle est capable de mettre en mouvement les électrons libres du circuit.

S'il est exact que la borne positive possède un déficit d'électron et que la borne négative possède un excès d'électron, le champ dipolaire créé par ces

FIGURE 4.2 – Le champ dipolaire créé par les charges situées sur les pôles d’une pile ne peut, à lui seul, rendre compte du mouvement des électrons (ou du sens du courant) dans les fils du circuit.



deux seules charges ne peut à lui seul expliquer la circulation des électrons dans un circuit qui ne suit pas exactement les lignes du champ en question, comme on peut le voir sur la figure 4.2. Ce point avait très justement été mis en avant dans une proposition didactique de CHABAY et SHERWOOD 2006. Ces auteurs invitaient à expliciter la distribution de charge présente le long des fils du circuit, cf. figure 4.3. Mais le problème de l’explication « dipolaire » pour la circulation des charges est plus criant encore si l’on s’intéresse à l’intérieur de la pile. En effet dans le cas où la pile est en situation de décharge, les cations circulent à l’intérieur de celle-ci en direction du pôle positif et les anions en direction du pôle négatif, voir par exemple la pile Daniell de la figure 4.4. Dans les explications courantes que l’on trouve dans les livres du secondaire, ce point est souvent justifié par « l’énergie chimique ». Tout se passe alors comme si l’on devait réserver les explications physiques à l’extérieur de la pile et les explications chimiques à l’intérieur.

Pourtant des alternatives existent, comme celle consistant à présenter l’allure du potentiel tout le long du circuit, et en particulier, la discontinuité,

FIGURE 4.3 – Evocation de la répartition des charges dans un circuit simple en régime stationnaire d'après CHABAY et SHERWOOD 2006. Des charges de surfaces sont représentées en différents points du circuit pour que le gradient de charge et le champ soient explicites. Non représentées ici, les charges au voisinage des courbes du circuit sont essentielles pour expliquer que les électrons ont partout une vitesse moyenne parallèle au fil.

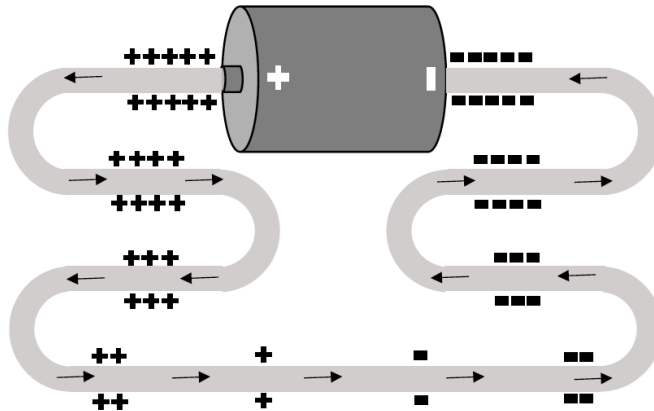


FIGURE 4.4 – Une pile Daniell en situation de décharge

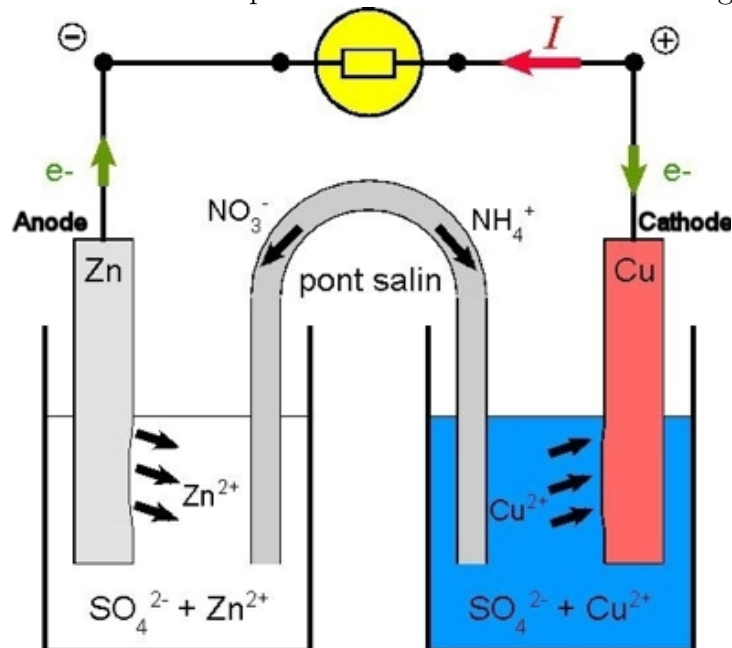
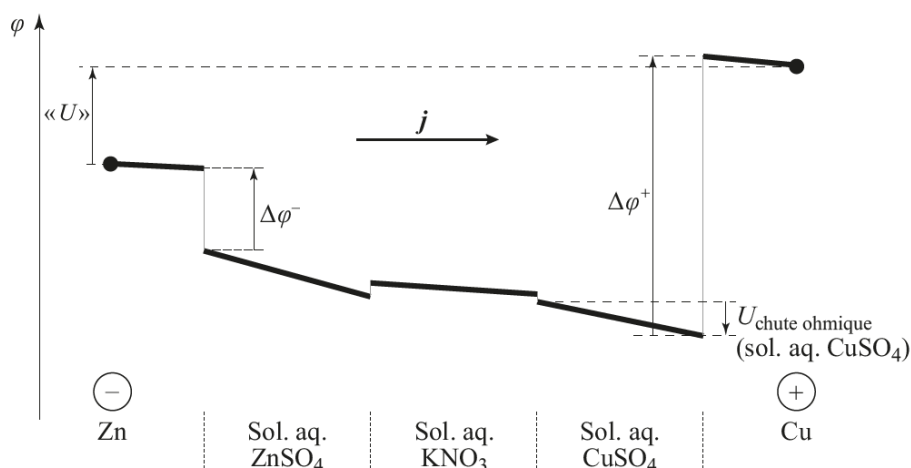


FIGURE 4.5 – Profil de potentiel dans une pile Daniell parcourue par un courant en fonctionnement générateur (d’après LEFROU, FABRY et POIGNET 2013)



à l’échelle macroscopique du potentiel entre chaque électrode et la solution à son contact. Cette discontinuité de potentiels, permet de comprendre le sens de circulation des ions, mais aussi de donner du sens aux potentiels des couples rédox intervenants dans la pile et de montrer que les pertes ohmiques internes à la pile ne diffèrent en rien des pertes ohmiques dans le reste du circuit. La figure 4.5 tirée de LEFROU, FABRY et POIGNET 2013 illustre cette explication.

Nous avons commencé à interroger quelques enseignants au sujet de l’explication classique exposée précédemment. Ceux-ci nous ont semblé particulièrement résistant à la critique, quand bien même cette explication entraînait en contradiction directe avec d’autres explications, tout aussi classiques, au sujet des électrolyseurs, comme celle présente sur le site de l’académie de Nancy (*Le Courant Électrique Dans Les Solutions Aqueuses* 2014) :

Comme une solution ionique est liquide, toutes les particules qui la constituent se déplacent librement (propriété de l’état liquide) et de manière aléatoire. Lorsque cette solution intègre un circuit électrique toutes les particules qui portent des charges électriques (les ions) ne se déplacent plus librement, mais elles vont être attirées par les bornes du générateur :

- les anions (portent des charges négatives comme les électrons) sont attirés par la borne + du générateur et ils se déplacent donc dans le sens inverse du sens conventionnel du courant

continu.

- les cations (portent des charges positives) sont attirés par la borne — du générateur et ils se déplacent dans le même sens que le sens conventionnel du courant continu.

Ces premiers entretiens demandent encore à être entièrement dépouillés, et cet exemple n'en est qu'un parmi de nombreux rituels explicatifs. Un travail de recherche important sur ces aspects reste donc à effectuer en parallèle de la question de la formation.

Avant de passer aux perspectives de recherches conjointes pouvant unir nos deux principales lignes d'étude, signalons que les pistes que nous venons d'évoquer ici ne sont pas totalement disjointes du projet de recherche SARA-BANDES (Stimuler l'Apprentissage et la Réflexion par des Ateliers de Bande Dessinée), projet auquel nous avons activement contribué. Au cours de ce projet de recherche, nous avons cherché à caractériser la manière dont le savoir circulait et se transformait lors de son passage parmi différents acteurs d'ateliers de bandes dessinées : un chercheur exposant certains de ses résultats, un médiateur scientifique, un dessinateur et des adolescents chargés de communiquer sous forme d'une planche de BD un savoir exposé par le chercheur. Un des résultats mis en évidence lors de ce projet était la part importante d'implicite que véhiculaient les planches de BD créées par les participants à ces ateliers. Recenser les facteurs de risque liés à ces implicites mais aussi les failles éventuelles que l'on peut relever dans ces planches de BD, était une manière de s'interroger sur un "lecteur-modèle" de ces BD, et a guidé nos analyses des planches en question (HOSSON, BORDENAVE, DAURES, DÉCAMP, HACHE, HOROKS, GUEDIRI et al. 2018 ; HOSSON, BORDENAVE, DAURES, DÉCAMP, HACHE, HOROKS et KERMEN 2019). Nous ne nous sommes pas (encore) intéressés au « vrai lecteur », mais le travail exposé ici nous paraît également porteur de clés pour étudier ce futur lecteur des planches de BD sciences...

4.3 Quelques perspectives conjointes ?

Cette dernière partie pourrait sembler un passage obligé au cours d'une HDR. Cependant il n'est pas inutile de s'interroger sur les liens qui pourraient unir nos deux principales lignes de recherche.

Le premier qui vient à l'esprit concerne l'utilisation de l'histoire pour développer l'attitude critique. Cet aspect est régulièrement mis en avant dans les programmes du secondaire, et le dernier programme de l'enseignement scientifique de 1re (MEN 2019e) n'échappe pas à la règle. Il précise par exemple à l'occasion du chapitre sur la forme de la Terre :

Au-delà de la dimension historique et culturelle, la mise en œuvre de différentes méthodes de calcul de longueurs à la surface de la Terre permet de développer des compétences mathématiques de calcul et de représentation et invite à exercer un esprit critique sur les différents résultats obtenus, les approximations réalisées et les limites d'un modèle.

Du côté de la recherche en didactique, différents auteurs ont prôné l'utilisation de l'histoire des sciences pour le développement de l'esprit critique, en particulier par le biais des controverses historiques (ALLCHIN 1999 ; IRWIN 2000 ; ALBE 2009 ; HÖTTECKE, HENKE et RIESS 2010)

Si c'est effectivement une voie intéressante, nous y voyons au moins deux écueils. Le premier est qu'une vision trop schématique de ces controverses peut instiller une perception quelque peu faussée de l'histoire. Le danger étant que l'élève n'y voie que des vainqueurs et des vaincus, une linéarité et un sens du progrès assez éloignés de la représentation que les historiens ont aujourd'hui de leur propre discipline. Le second écueil possible est plus étroitement relié à nos recherches : dans le cas où un résultat obtenu par un savant du passé correspond à un savoir encore considéré aujourd'hui comme légitime, nous pouvons faire l'hypothèse que la démarche suivie par ce savant sera peut-être considérée comme aussi valide que le résultat auquel elle aboutit et donc, peu soumise à la critique. Il s'agirait là d'un « facteur de risque » spécifique à certains épisodes historiques.

Pour l'illustrer, prenons l'exemple de Galilée et de la chute des corps. Parmi les différentes justifications que Galilée avance pour affirmer que tous les corps tombent à la même vitesse quelle que soit leur masse (contrairement à ce qu'affirme Aristote), il en est une qui a marqué les esprits. Il s'agit de faire une démonstration par l'absurde. Voici comment elle est décrite par Stanislas Dehaene dans son livre *Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines* (DEHAENE 2018, p. 307-308) dans un passage où il s'émerveille des capacités nocturnes du cerveau :

On doit à l'imagerie mentale certaines des plus grandes découvertes scientifiques - lorsque Einstein rêve qu'il chevauche un photon ou que Newton imagine que la lune tombe comme une pomme. Sait-on que la célèbre expérience de Galilée, dans laquelle il laisse tomber des objets de la tour de Pise afin de prouver que la chute des corps ne dépend pas de leur masse, n'a peut-être jamais eu lieu ? C'est avant tout une expérience de pensée : Galilée imagine qu'on laisse tomber deux sphères, l'une légère et l'autre lourde, du haut de la tour de Pise. Il raisonne par l'absurde. Supposons, dit-il que la plus lourde tombe plus vite. Imaginons que je l'at-

tache à l'autre par un fil de masse négligeable. L'ensemble des deux sphères, puisqu'il forme un objet plus lourd, devrait tomber encore plus vite. Mais, c'est absurde, car la sphère légère, qui tombe moins vite, devrait ralentir la plus lourde. Ce faisceau de contradiction n'a qu'une seule issue : tous les objets tombent à la même vitesse, quelle que soit leur masse.

Voilà le type d'argument dont notre stimulateur mental est capable, dans la veille comme dans le sommeil. Le fait même que nous sachions dérouler de tels faisceaux imaginaires met en valeur l'extraordinaire panoplie d'algorithme de notre cerveau. Nous apprenons bien sûr pendant la veille, mais l'activité nocturne de notre cerveau démultiplie notre potentiel. Il n'est d'ailleurs pas impossible que ce soit l'un des secrets de l'espèce humaine : il semblerait que, parmi tous les primates, notre sommeil soit l'un des plus profonds et des plus efficaces.

Passons sur les « anecdotes ». Passons également sur le fait que l'épisode historique est plus subtil que ce résumé très succinct (cf. KOYRÉ 1960) : on trouve cette justification sous des formes peu ou prou équivalente dans plusieurs livres et il est en effet possible d'extraire du *discours sur deux sciences nouvelles* un passage correspondant approximativement à ce qui est relaté plus haut (voir Annexe C). Ce qui nous intéresse ici, c'est que l'émerveillement qui suit l'obtention du « bon résultat » masque les failles de la justification proposée : s'il est exact que la vitesse de chute des corps est indépendante de leur masse dans le vide, ce n'est pas le cas lorsque la chute a lieu dans un fluide. Or cet aspect n'est pas mentionné dans l'extrait tel qu'il est repris ici, il y a donc forcément une faille dans le raisonnement. D'ailleurs il suffit de faire une autre expérience de pensée et de remplacer la petite sphère par un parachute (qui augmentera lui aussi la masse de l'ensemble) pour se convaincre qu'il y a bien un problème... Cet exemple nous laisse penser que certains épisodes historiques peuvent être jugés à l'aune de la postérité des résultats auxquels ils conduisent et non de leur validité intrinsèque ce qui inhiberait en quelque sorte la critique.

Une première manière de lier nos travaux pourrait donc consister à repérer ce qui, dans l'utilisation de l'histoire des sciences permet d'activer (comme on l'évoque souvent) ou au contraire risque d'inhiber (comme cela semble être le cas dans l'exemple précédent) l'attitude critique dans le domaine conceptuel, et à quelle(s) condition(s). Il nous semble qu'il y a là tout un champ de recherche jusqu'ici peu exploré.

Une autre manière de les lier consiste à se demander si l'exercice critique s'exerce indifféremment sur des textes historiques ou des explications

physiques plus récentes et sur ce qui différencie au fond ces deux situations, cette question n'est d'ailleurs pas totalement indépendante de la première et l'exemple précédent peut également se révéler intéressant à ce sujet : si l'on jette un œil au texte original de Galilée (annexe C), texte qui n'est pas tout à fait original d'ailleurs, puisqu'il s'agit d'une version traduite, on voit qu'il y est question de graves, d'impetus, de vitesse naturelle, de degrés de vitesse... Autant de concepts qui ne font plus directement sens aujourd'hui chez le lecteur, car ils n'ont plus de liens simples avec notre réseau de concepts actuels. Il est bien sûr possible, pour certains d'entre-eux, de les « traduire » en des concepts plus actuels, mais, outre les risques de contresens que cela engendre, ces termes peuvent nettement compliquer la tâche du lecteur. À nouveau, cela risque d'inhiber son attitude critique, mais cette fois pour une autre raison : celle de n'être jamais bien sûr d'avoir compris le sens premier du texte étudié.

À l'inverse, un lecteur candide pourra se montrer excessivement critique à tort sur un texte historique, en se méprenant sur certains termes identiques aux termes actuels mais dont le sens a varié au cours du temps. Dans le texte de l'annexe A, Alexandrie et Syène sont « sous » un même méridien et non « sur » un même méridien, car il s'agit de méridiens célestes et non terrestres, méridiens terrestres qui sont de leur côté plutôt qualifiés de « grands cercles de la Terre ». Dans le premier texte de l'annexe B, il est question du centre de la Terre, mais il faut avoir présent à l'esprit que la surface de la Terre est plate dans la cosmologie chinoise de l'époque pour bien comprendre ce dont il s'agit.

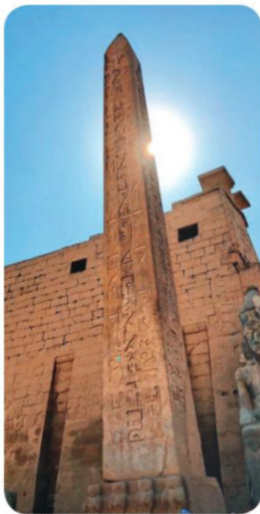
Quant aux textes ou aux interprétations de seconde main, ceux-ci pèchent souvent par les approximations qu'ils contiennent, et la critique qu'on peut faire de ces textes est parfois sans lien aucun avec celle des sources originales sur lesquelles ils s'appuient. Ainsi, si l'on peut critiquer la notion d'expérience cruciale, (car comme le dit DUHEM 1981 : « la vérité d'une théorie physique ne se décide pas à croix ou pile ») et si pour cela on s'intéresse à la très célèbre expérience du prisme de NEWTON 1671 (également traduite et commentée dans GUTHMANN 2010), on sera très surpris de constater que la transposition qui en est faite dans une séquence présentée sur le site de l'académie de Nantes (HOUDET 2015) est tellement éloignée de l'original, que l'on peut avoir l'impression, à sa lecture, que l'expérience de Newton a consisté à découvrir qu'un prisme permettait d'obtenir un « arc-en-ciel », phénomène pourtant connu dès l'antiquité (et qui plus est en proposant de reproduire l'expérience en remplaçant le prisme par un réseau!).

Dans une veine similaire, alors que certains auteurs antiques relatent bien qu'Anaxagore (V^e siècle avant notre ère) faisait l'hypothèse que la Terre était plate et que le Soleil surpassait le Péloponnèse en grandeur, rien n'indique en

FIGURE 4.6 – Extrait du manuel Magnard comparant les méthodes d’Anaxagore et d’Ératosthène (CHESTIER-CHARLERY et al. 2019)

Doc. 1 Hypothèse d'Anaxagore

- ▶ Au IV^e siècle av. J.-C., Anaxagore fut le premier philosophe à s'établir à Athènes.
- ▶ Il étudia la forme de la Terre et fit les constatations suivantes :
 - > un gnomon vertical planté à Syène n'a pas d'ombre, à midi, le jour du solstice d'été ;
 - > alors que le même jour et à la même heure, les rayons du Soleil font un angle d'environ 7° avec un gnomon vertical à Alexandrie.
- ▶ Les bématises dont le rôle était de mesurer des distances à l'aide de leurs chameaux mesurèrent la distance entre Syène (Assouan en Égypte) et Alexandrie. Leurs pas étaient si réguliers que le temps de marche était converti automatiquement en stades. Ils trouvèrent une distance entre Alexandrie et Syène égale à 5 000 stades.
- ▶ Anaxagore postule que la Terre est plate et que le Soleil n'en est pas suffisamment éloigné pour que ses rayons soient parallèles quand ils atteignent notre planète. Son hypothèse le conduit à une distance Terre-Soleil égale à 6 400 km. C'est en fait la longueur du rayon de la Terre...



Doc. 2 La méthode d'Ératosthène

- ▶ Deux siècles plus tard, le philosophe grec Ératosthène fait les mêmes observations :
 - > les rayons du Soleil à son zénith le jour du solstice d'été frappent le fond d'un puits à Syène en Égypte ;
 - > dans les mêmes conditions, il mesure la distance angulaire entre Syène et Alexandrie grâce à l'ombre de l'obélisque de la bibliothèque d'Alexandrie.
- ▶ Il met alors en relation cette distance angulaire avec la distance mesurée sur le terrain qui vaut 5 000 stades. Il déduit ainsi la valeur de la circonférence terrestre et son rayon.



Érudits dans la bibliothèque d'Alexandrie, détruite en 642, Égypte, gravure de la fin du XIX^e siècle, collection privée

revanche qu'il ait calculé la distance Terre-Soleil, qui plus est à partir de la distance Syène-Alexandrie (ville fondée en 331 avant notre ère) et de mesures identiques à celle d'Eratosthène (ayant vécu au III^e siècle avant notre ère). C'est pourtant ce qui est affirmé dans bien des manuels (cf. figure 4.6, extraite de CHESTIER-CHARLERY et al. 2019), voire dans des documents officiels d'accompagnement des programmes (MEN 2019a, p. 4). Nous discutons la transposition de cet épisode historique dans DÉCAMP et HOSSON 2020.

Comme on le voit, la critique de ces textes historiques, de première ou de seconde main, présente des spécificités qui ne sont pas réductibles à leur simple contenu conceptuel. La question de la formation des enseignants à cette critique spécifique sera alors un enjeu crucial pour la réussite du nouvel enseignement scientifique qui s'est mis en place l'an dernier à l'occasion de la dernière réforme du lycée.

Annexe A

Le procédé d'Ératosthène selon le récit de Cléomède

Extrait de la *Théorie élémentaire* ou *De motu circulari corporum celestium* de Cléomède, dans la traduction de AUJAC 2001 :

« Le procédé d'Ératosthène, qui relève de la géométrie, passe pour un peu plus obscur. Pour clarifier son propos, nous allons formuler les diverses hypothèses de départ. Posons en premier lieu, dans ce cas aussi, que Syène et Alexandrie sont sous le même méridien ; en second lieu, que la distance entre les villes est de 5 000 stades ; en troisième lieu, que les rayons émis par différentes parties du soleil sur différentes parties de la Terre sont parallèles, ce que les géomètres prennent pour hypothèse ; en quatrième lieu, ce qui est démontré par les géomètres, que les droites qui coupent des parallèles déterminent des angles alternes égaux, en cinquième lieu, que les arcs interceptés par des angles égaux sont semblables, c'est-à-dire qu'ils sont dans la même proportion et le même rapport avec leurs cercles propres, ce qui est également démontré par les géomètres car chaque fois que des arcs sont interceptés par des angles égaux, si l'un d'eux, n'importe lequel est la dixième partie de son cercle propre, tous les autres seront la dixième partie de leur cercle propre. Une fois ces notions maîtrisées, il ne sera pas difficile de saisir la démarche d'Ératosthène, que voici. Sont situées sous un même méridien, dit-il, Syène et Alexandrie. Puisque donc les méridiens sont des grands cercles de l'univers, les cercles terrestres situés à l'aplomb de ceux-ci doivent nécessairement être des grands cercles, si bien que la dimension attribuée par raison démonstrative au cercle terrestre traversant Syène et Alexandrie sera aussi celle du grand cercle de la Terre. Ératosthène dit, ce qui est vrai, que Syène est située sous le tropique d'été. Donc, chaque fois que le soleil, parvenu dans le Cancer, au solstice d'été, culmine exactement au méridien, les gnomons des horloges sont sans ombre, nécessairement, puisque

le soleil est situé exactement à la verticale (cela se produit, dit-on, sur un rayon de 150 stades). À Alexandrie à la même heure les gnomons des horloges projettent une ombre, vu que cette cité est située au nord de Syène. Comme ces villes sont situées sous un même méridien ou grand cercle, si nous décrivons un arc allant de l'extrémité de l'ombre du gnomon à la base même du gnomon de l'horloge d'Alexandrie, l'arc en question sera une section du grand cercle de la *scaphè*, puisque la *scaphè* de l'horloge est située à l'aplomb d'un grand cercle. Si donc nous imaginons des droites prolongeant les deux gnomons à travers la Terre, elles se rencontreront au centre de la Terre. Puisque l'horloge à Syène est située à la verticale du soleil, si nous imaginons une droite allant du soleil à l'extrémité du gnomon de l'horloge, il n'y aura qu'une seule droite allant du soleil au centre de la Terre. Si nous imaginons, à partir de la *scaphè* à Alexandrie, une autre droite partant de l'extrémité de l'ombre du gnomon et, par l'extrémité du gnomon, allant jusqu'au soleil, cette droite et celle précédemment définie seront parallèles, puisqu'elles vont de différentes parties du soleil à différentes parties de la Terre. Or ces droites parallèles sont coupées par la droite qui va du centre de la Terre au gnomon placé à Alexandrie, ce qui produit des angles alternes égaux : l'un est situé au centre de la Terre, à l'intersection des droites menées des horloges jusqu'au centre de la Terre ; l'autre est situé à l'intersection de l'extrémité du gnomon à Alexandrie et de la droite menée depuis l'extrémité de son ombre en direction du soleil en passant par la pointe du gnomon. Sur celui-ci, est construit l'arc qui va de l'extrémité de l'ombre du gnomon à sa base ; sur l'autre, celui qui est au centre de la Terre, est construit l'arc qui va de Syène à Alexandrie. Donc les arcs de cercle sont semblables, puisque construits sur des angles égaux. Et donc le rapport de l'arc dans la *scaphè* à son cercle propre est le même que celui de l'arc Syène-Alexandrie à son cercle propre. Or l'arc dans la *scaphè* vaut, trouve-t-on, un cinquantième de son cercle propre ; nécessairement donc, la distance Syène-Alexandrie doit valoir un cinquantième du grand cercle de la Terre. Or la distance en question est de 5 000 stades ; et donc le cercle entier vaut au total 250 000 stades. Telle est la démarche d'Ératosthène. »

Annexe B

La cosmologie des Zhou

Les deux textes reproduits ci-après évoquent la cosmologie des Zhou. Dans ce modèle la Terre peut être considérée comme de surface plate (en forme de disque) et le Soleil est situé sur une demi-sphère s'appuyant sur le disque formé par la surface de la sphère.

B.1 le Chin shu ou « histoire des Chin »

La première source chinoise proposée est un extrait du Chin Shu ou « histoire des Chin ». Il s'agit de l'histoire dynastique officielle de la dynastie Chin (+256/+420), histoire qui a été écrite aux alentours de l'an 635 de notre ère, sous le règne de l'empereur T'ai Tsung (règne : +628/+649) par un collectif d'auteurs. Cette histoire dynastique comprend quelques chapitres astronomiques. L'extrait traduit ci-dessous, qui présente la théorie de Wang Fan, est repris d'un article de KALINOWSKI 1990 ; on trouvera une édition anglaise complète des chapitres astronomiques du Chin Shu dans la traduction de HO 1967.

Rites des Zhou : "[le lieu où] l'ombre du solstice est d'un pied et demi, on l'appelle le milieu de la Terre". Le commentaire de Zheng Zhong donne les précisions suivantes : "La tablette étalon mesure un pied et demi. Le jour du solstice d'été, on érige un gnomon de huit pieds. Si [à midi] son ombre coïncide avec la tablette étalon [l'endroit où se trouve érigé le gnomon] sera nommé milieu de la terre. Ce lieu correspond à l'actuelle Yangcheng dans la préfecture de Yingchuan." Selon Zheng Xuan, "le rapport de l'ombre du Soleil aux distances terrestres est tel qu'il y a une différence d'un pouce pour un déplacement de mille li. Puisque l'ombre [solsticielle] mesure un pied et demi, le lieu [se trouvant

ce jour-là] à la verticale du Soleil sera à 15 000 li au sud [du gnomon]”. De ceci, on peut déduire que la distance verticale du Soleil à la Terre [le jour du solstice d’été] est de 80 000 li et que le demi-diamètre du Ciel correspond à la longueur du rayonnement oblique du Soleil sur Yangcheng. Puisque la figure du Ciel est ronde comme une boule, que la Terre se tient en sa moitié et que Yangcheng en occupe le centre, la distance de ce lieu au Soleil ne variera pas ; elle sera toujours égale, quels que soient l’heure du jour ou le moment de l’année. C’est pourquoi nous savons que le rayonnement oblique du Soleil sur Yangcheng représente le demi-diamètre du Ciel.

Note ¹ : 1 pied = 1 chi = 10 pouces = 24 cm ; 1 pouce = 1 cun = 2,4 cm ; 1 li = 560 m.

B.2 Le Zhou Bi Suan Jing

La deuxième source historique que nous explorons ici est empruntée au Zhou bi : une collection de textes chinois anciens sur l’astronomie et les mathématiques rassemblée probablement sous la dynastie Han (1er siècle avant notre ère) bien qu’il soit traditionnellement supposé qu’ils aient été écrits sous la dynastie Zhou, mille ans plus tôt (CULLEN 2007). D’après l’explication donnée dans le texte lui-même (cf. l’extrait ci-dessous), le titre peut être traduit par « le gnomon des Zhou ».

Ce texte évoque la même procédure que celle de l’extrait du Chin Shu mais de manière plus concise. Si la variante qu’elle présente peut être considérée comme plus difficile pour la compréhension, il nous a semblé intéressant de la présenter car on trouve dans un des commentaires de ce texte une proposition de démonstration de la relation de proportionnalité entre l’ombre du gnomon et la distance de celui-ci au point situé à l’aplomb du Soleil. L’extrait ci-dessous a été traduit en français par nos soins à partir de la version anglaise complète de Cullen (CULLEN 2007, p. 178-179) :

#B10[26c] Le zhou bi fait 8 chi de long. Le jour du solstice d’été son ombre [méridienne] fait un chi et six cun. Le bi est la hauteur [du triangle rectangle] et son ombre [méridienne] exacte est la base. 1000 li plus au sud la base fait un chi et cinq cun, et 1000

1. La valeur du li a beaucoup varié au cours des siècles. KALINOWSKI 1990 évoque une valeur de 432 m correspondant effectivement à 1800 pieds. CULLEN 2007, p. 113-114 utilise une valeur de 500 m. La valeur de 560 m ici proposée est à prendre comme un majorant des différentes valeurs que l’on peut trouver dans la littérature.

li plus au nord la base fait un chi et 7 cun. Plus le soleil est au sud, plus l'ombre est longue.

#B12[34h] Méthode : le zhou bi fait 8 chi de long, et la diminution ou l'augmentation de la base est d'un cun pour mille li.

#B15[34m] Rong Fang a demandé : "qu'entend-t-on par [le terme] zhou bi ?" Chen Zi a répondu : "Dans les temps anciens le Fils du Ciel régnait depuis Zhou. Cela signifie que ces quantités étaient observées à Zhou, d'où le terme zhou bi. Bi signifie biao, gnomon."

Annexe C

Extrait du discours concernant deux sciences nouvelles de Galilée

Dans cet extrait du *Discours concernant deux sciences nouvelles* (GALILEI 1970), Salviati apporte à Simplicio une justification du fait que la vitesse de chute ne dépend pas de la masse. Pour plus de détails concernant cet extrait, on pourra consulter KOYRÉ 1960.

Salviati. — Or, même sans expérience, nous pouvons, par une démonstration brève et concluante, prouver clairement qu'il n'est pas vrai qu'un mobile plus lourd se meut plus vite qu'un autre, moins lourd, étant entendu que ces mobiles sont de la même matière et, en somme, du genre de ceux dont parle Aristote. Mais dites-moi, Sign. Simplicio, si vous admettez que tout corps (grave) qui tombe possède une certaine vitesse, déterminée par la nature, et que l'on ne peut ni l'accroître ni la diminuer, si ce n'est en usant de la violence ou en lui opposant quelque résistance ?

Simplicio. — On ne peut pas mettre en doute que le même mobile, se mouvant dans le même milieu, possède une vitesse fixée et déterminée par la nature, laquelle [vitesse] ne peut pas être augmentée si ce n'est par un nouvel impetus à lui [mobile] conféré, ou diminuée, sauf par une résistance qui le retarde.

Salviati. — Lors donc que nous avons deux mobiles, dont les vitesses naturelles seraient inégales, il est clair que, si nous joignons le plus lent au plus rapide, celui [le mouvement] du plus rapide sera partiellement retardé [par le plus lent], et celui du plus lent, partiellement accéléré par le plus rapide. N'êtes-vous pas d'accord

avec moi sur cette opinion ?

Simplicio. — Il me semble que c'est ce qui doit suivre indubitablement.

Salviati. — Mais s'il en est ainsi, et qu'il soit vrai en même temps qu'une grande pierre se meut avec, par exemple, huit degrés de vitesse, et une plus petite, avec quatre ; alors, si on les joint ensemble toutes les deux, le composé se mouvra avec une vitesse moindre que huit degrés : mais les deux pierres, jointes ensemble, font une pierre plus grande que la première, qui se mouvait avec huit degrés de vitesse : ainsi donc le composé (qui est plus grand que la première pierre seule) se meut plus lentement que cette première seule, qui est plus petite. Ce qui est contraire à votre supposition. Vous voyez donc comment, de votre supposition que le mobile plus lourd se meut plus rapidement que le moins lourd, je conclus que le [corps] plus lourd se meut moins rapidement.

Bibliographie

- ADAIR, Aaron M. (2013). « Student Misconceptions about Newtonian Mechanics : Origins and Solutions through Changes to Instruction ». The Ohio State University. URL : https://etd.ohiolink.edu/pg_10?0::NO:10:P10_ACCESSION_NUM:osu1386034522 (visité le 16/08/2020).
- ALBE, Virginie (2009). *Enseigner des controverses*. Paideia. Rennes : Presses Univ. de Rennes. 223 p. ISBN : 978-2-7535-0818-7.
- ALLCHIN, Douglas (1999). « Values in Science : An Educational Perspective ». In : *Science & Education* 8.1, p. 1–12. ISSN : 09267220. DOI : 10.1023/A:1008600230536. URL : <http://link.springer.com/10.1023/A:1008600230536> (visité le 15/09/2020).
- ANDRÉ, Adeline et al. (2019). *Enseignement scientifique : 1re : programme 2019*. Bordas. ISBN : 978-2-04-733690-8.
- AUJAC, Germaine (2001). *Eratosthène de Cyrène, le pionnier de la géographie : sa mesure de la circonférence terrestre*. Contient, en l'absence de textes conservés, un chapitre de "Textes à l'appui" rassemblant les témoignages d'auteurs plus tardifs, en particulier de Strabon. Paris, France : Éditions du CTHS. 224 p. ISBN : 978-2-7355-0457-2.
- BACHELARD, Gaston (1938). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance*. Bibliothèque des textes philosophiques. Paris : Vrin. 256 p. ISBN : 978-2-7116-1150-8.
- BACON, Francis (1620). *Novum Organum*.
- BARROW, Robin (1991). « The Generic Fallacy ». In : *Educational Philosophy and Theory* 23.1, p. 7–17. ISSN : 0013-1857, 1469-5812. DOI : 10.1111/j.1469-5812.1991.tb00172.x. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1469-5812.1991.tb00172.x> (visité le 01/08/2020).
- BEAU, Tristan et al. (2019). *Enseignement scientifique 1re : nouveau programme*. Belin. ISBN : 979-10-358-0596-8 979-10-358-0542-5.
- BENSEGHIR, Abdelmadjid (1989). « Transition Électrostatique-Électrocinétique : Point de Vue Historique et Analyse Des Difficultés Des Élèves ». Paris 7. URL : <http://www.theses.fr/1989PA077011> (visité le 16/08/2020).

- BESSON, Ugo (2004). « Students' Conceptions of Fluids ». In : *International Journal of Science Education* 26.14, p. 1683–1714. ISSN : 0950-0693, 1464-5289. DOI : 10.1080/0950069042000243745. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0950069042000243745> (visité le 17/08/2020).
- BESSON, Ugo et Laurence VIENNOT (2004). « Using Models at the Mesoscopic Scale in Teaching Physics : Two Experimental Interventions in Solid Friction and Fluid Statics ». In : *International Journal of Science Education* 26.9, p. 1083–1110. ISSN : 0950-0693, 1464-5289. DOI : 10.1080/0950069042000205396. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0950069042000205396> (visité le 17/08/2020).
- BONNEAU, Marie-Anne et al. (2019). *Enseignement scientifique 1re : comment les sciences expliquent le monde*. Hachette. ISBN : 978-2-01-395498-3.
- BOON NG, Soo (2019). « Exploring STEM Competencies for the 21st Century ». In : p. 53. URL : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368485.locale=fr>.
- CAPITAN, Anne-Laure et al. (2019). *Enseignement scientifique 1re : réforme 2019*. Didier. ISBN : 978-2-278-09463-9.
- CHABAY, Ruth et Bruce SHERWOOD (2006). « Restructuring the Introductory Electricity and Magnetism Course ». In : *American Journal of Physics* 74.4, p. 329–336. ISSN : 0002-9505, 1943-2909. DOI : 10.1119/1.2165249. URL : <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2165249> (visité le 13/09/2020).
- CHANG, Hsin-Yi et Hsiang-Chi CHANG (2013). « Scaffolding Students' Online Critiquing of Expert- and Peer-Generated Molecular Models of Chemical Reactions ». In : *International Journal of Science Education* 35.12, p. 2028–2056. ISSN : 0950-0693, 1464-5289. DOI : 10.1080/09500693.2012.733978. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500693.2012.733978> (visité le 03/08/2020).
- CHESTIER-CHARLERY, Anne et al. (2019). *Enseignement scientifique : 1re : programme 2019*. Magnard. ISBN : 978-2-210-11254-4 978-2-210-11265-0.
- CHEVALLARD, Yves (1991). *La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné*. Autres tirages : 1997, 1998, 2007. Grenoble, France : la Pensée sauvage. 240 p. ISBN : 978-2-85919-078-1.
- Couverture de survie (2020). In : *Wikipédia*. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Couverture_de_survie&oldid=167715247 (visité le 12/08/2020).
- CULLEN, Christopher (2007). *Astronomy and Mathematics in Ancient China : The 'Zhou Bi Suan Jing'*. Cambridge University Press. 257 p. ISBN : 978-0-521-03537-8. Google Books : aLNH6p719q4C.

- Datation par le carbone 14* (2020). In : *Wikipédia*. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Datation_par_le_carbone_14&oldid=170380996 (visité le 28/07/2020).
- DAVIES, Martin (2013). « Critical Thinking and the Disciplines Reconsidered ». In : *Higher Education Research & Development* 32.4, p. 529–544. ISSN : 0729-4360, 1469-8366. DOI : 10.1080/07294360.2012.697878. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07294360.2012.697878> (visité le 01/08/2020).
- DÉCAMP, Nicolas et Cécile de HOSSON (2011). « Quelques éléments historiques et didactiques sur l'expérience d'Ératosthène ». In : *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie* 105, p. 1065–1082. URL : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21076.
- (2012). « Implementing Eratosthenes' Discovery in the Classroom : Educational Difficulties Needing Attention ». In : *Science & Education* 21.6, p. 911–920. ISSN : 0926-7220, 1573-1901. DOI : 10.1007/s11191-010-9286-3. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11191-010-9286-3> (visité le 14/06/2020).
- (2018). « Approcher l'astronomie mathématique en classe : un exemple d'usage d'éléments d'histoire des cosmologies chinoises et grecques ». In : *Les mathématiques et le réel*. Sous la dir. d'Évelyne BARBIN, Dominique BÉNARD et Guillaume MOUSSARD. 1re. Essais. Rennes : PUR, p. 173–194. ISBN : 978-2-7535-6531-9. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01734845> (visité le 14/06/2020).
- (2020). « Ératosthène et Anaxagore dans l'Enseignement Scientifique. Embûches et opportunités. » In : *Images des mathématiques*. URL : <https://images.math.cnrs.fr/Eratosthene-et-Anaxagore-dans-l-enseignement-scientifique.html>.
- DÉCAMP, Nicolas et Laurence VIENNOT (2015). « Co-Development of Conceptual Understanding and Critical Attitude : Analyzing Texts on Radiocarbon Dating ». In : *International Journal of Science Education* 37.12, p. 2038–2063. ISSN : 0950-0693, 1464-5289. DOI : 10.1080/09500693.2015.1061720. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09500693.2015.1061720> (visité le 14/06/2020).
- (2018). « Un parcours de développement conceptuel et critique à propos de l'explication du sens du courant électrique ».
- DEHAENE, Stanislas (2018). *Apprendre ! : les talents du cerveau, le défi des machines*. Paris, France : Odile Jacob. 380 p. ISBN : 978-2-7381-4542-0.
- DIU, Bernard et al. (1989). *Éléments de Physique Statistique*. Collection Enseignement Des Sciences 37. Paris : Hermann. 1001 p. ISBN : 978-2-7056-6065-9.

- DUCOURANT, Dominique (2007). « L'observation d'Ératosthène En Cinquième. Avec Deux Punaises. » In : *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie* 896, p. 825–841. URL : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=19677.
- DUHEM, Pierre (1981). *La théorie physique : son objet, sa structure*. Sous la dir. de Paul BROUZENG. Autres tirages : 1989, 1991, 1993, 1997. - Reproduction fac-similé avec avant-propos, index et bibliographie par Paul Brouzeng de la 2e édition publiée à Paris par M. Rivière en 1914. Paris, France : Librairie philosophique J. Vrin. xvi+524. ISBN : 978-2-7116-0221-6.
- DUTKA, Jacques (1993). « "Eratosthenes' Measurement of the Earth Reconsidered" ». In : *Archive for History of Exact Sciences* 46.1, p. 55–66. ISSN : 0003-9519, 1432-0657. DOI : 10.1007/BF00387726. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF00387726> (visité le 24/08/2020).
- ENGEL CLOUGH, Elizabeth et Rosalind DRIVER (1985). « What Do Children Understand about Pressure in Fluids? » In : *Science & Education* 3.2, p. 133–144. ISSN : 0263-5143, 1470-1138. DOI : 10.1080/0263514850030106a. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0263514850030106a> (visité le 17/08/2020).
- ENNIS, Robert Hugh (1996). *Critical Thinking*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall. 407 p. ISBN : 978-0-13-374711-9.
- ETKINA, Eugenia et Gorazd PLANINŠIČ (2015). « Defining and Developing "Critical Thinking" Through Devising and Testing Multiple Explanations of the Same Phenomenon ». In : *The Physics Teacher* 53.7, p. 432–437. ISSN : 0031-921X. DOI : 10.1119/1.4931014. URL : <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4931014> (visité le 03/08/2020).
- FARGES, Huguette et al. (2002). *Mesurer la terre est un jeu d'enfant : sur les pas d'Ératosthène*. Paris : Le Pommier. ISBN : 978-2-7465-0101-0.
- FARLOUBEIX, B. (2002). *Courant Électrique*. URL : <http://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/Electro/e02coura.htm> (visité le 13/09/2020).
- GALILEI, Galileo (1970). *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*. Sous la dir. de Maurice CLAVELIN. Trad. de : Discorsi e dimostrazioni matematiche. Paris, France : A. Colin. xxv+263.
- GALILI, Igal et Amnon HAZAN (2000). « The Influence of an Historically Oriented Course on Students' Content Knowledge in Optics Evaluated by Means of Facets-Schemes Analysis ». In : *American Journal of Physics* 68.S1, S3–S15. ISSN : 0002-9505, 1943-2909. DOI : 10.1119/1.19518. URL : <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.19518> (visité le 22/08/2020).

- GOHAU, Gabriel (2002). « Redécouverte d'hier et d'aujourd'hui ». In : *Sciences naturelles et formation de l'esprit. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902 : études et documents*. Presses Universitaires du Septentrion. Histoire des sciences, p. 163–181. ISBN : 978-2-85939-749-4. URL : <http://www.septentrion.com/fr/livre/?GCOI=27574100176570>.
- GUEDJ, Muriel (2005). « Utiliser des textes historiques dans l'enseignement des sciences physiques en classe de seconde des lycées français : compte rendu d'innovation ». In : *Didaskalia* 26, p. 75–95. URL : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/23942/DIDASKALIA_2005_26_75.pdf;jsessionid=EE1805E67CBEEE30565A5470BA3D6858?sequence=1.
- GUEDJ, Muriel et Jean-Michel DUSSEAU (1999). « À Propos d'une Formation Des Enseignants de Sciences Physiques à l'épistémologie et à l'histoire Des Sciences ». In : 815.1, p. 991–1005. URL : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=7644.
- GUESNE, E. (1984). « Children's Ideas about Light ». In : *New Trends in Physics Teaching Vol. IV*. UNESCO, p. 179–192. ISBN : 92-3-102165-6. URL : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000136815>.
- GUTHMANN, Claude (2010). *Newton et La Naissance de La Théorie Des Couleurs*. URL : <http://journals.openedition.org/bibnum/743>.
- HALBWACHS, Francis (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Collection zethos. Neuchâtel : Delachaux, Niestlé. 230 p. ISBN : 978-2-603-00012-0.
- HALPERN, Diane F. (1998). « Teaching Critical Thinking for Transfer across Domains : Disposition, Skills, Structure Training, and Metacognitive Monitoring. » In : *American Psychologist* 53.4, p. 449–455. ISSN : 1935-990X, 0003-066X. DOI : 10.1037/0003-066X.53.4.449. URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0003-066X.53.4.449> (visité le 01/08/2020).
- HAZELKORN, Ellen et al., éd. (2015). *Science Education for Responsible Citizenship : Report to the European Commission of the Expert Group on Science Education*. EUR 26893 EN. Luxembourg : Publications Office of the European Union. 84 p. ISBN : 978-92-79-43637-6 978-92-79-43636-9.
- HO, Peng Yoke (1967). *The Astronomical Chapters of the Chin Shu*. Paris ; The Hague : Mouton & Co.
- HOSSON, Cécile de (2011). « L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique ». Habilitation à diriger des recherches. Université Paris-Diderot - Paris VII. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655594> (visité le 19/07/2020).
- HOSSON, Cécile de, Laurence BORDENAVE, Pierre-Laurent DAURES, Nicolas DÉCAMP, Christophe HACHE, Julie HOROKS, Nassima GUEDIRI et al.

- (2018). « Communicating Science through the Comics and Science Workshops : The Sarabandes Research Project ». In : *Journal of Science Communication* 17.2, A03. ISSN : 1824-2049. DOI : 10.22323/2.17020203. URL : https://jcom.sissa.it/archive/17/02/JCOM_1702_2018_A03 (visité le 14/06/2020).
- HOSSON, Cécile de, Laurence BORDENAVE, Pierre-Laurent DAURES, Nicolas DÉCAMP, Christophe HACHE, Julie HOROKS et Isabelle KERMEN (2019). « Quand l'élève devient auteur.e : analyse didactique d'ateliers BD-sciences ». In : *Tréma* 51 (51). ISSN : 1167-315X. DOI : 10.4000/trema.4895. URL : <http://journals.openedition.org/trema/4895> (visité le 14/06/2020).
- HOSSON, Cécile de et Bénédicte CAILLAREC (2009). « L'expérience de Blaise Pascal au Puy de Dôme : analyse des difficultés des étudiants de premier cycle universitaire et confrontation historique ». In : *Didaskalia* 34, p. 105–130. ISSN : 1250-0739. DOI : 10.4267/2042/30431. URL : <http://hdl.handle.net/2042/30431> (visité le 17/08/2020).
- HOSSON, Cécile de et Nicolas DÉCAMP (2011). « La procédure de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Ératosthène » : un support pour une reconstruction didactique ». In : *Grand N* 87, p. 77–91. URL : https://irem.univ-grenoble-alpes.fr/medias/fichier/87n4_1554195454788-pdf (visité le 14/06/2020).
- (2014). « Using Ancient Chinese and Greek Astronomical Data : A Training Sequence in Elementary Astronomy for Pre-Service Primary School Teachers ». In : *Science & Education* 23.4, p. 809–827. ISSN : 0926-7220, 1573-1901. DOI : 10.1007/s11191-013-9625-2. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11191-013-9625-2> (visité le 14/06/2020).
- (2015a). « From Didactic Transposition to Historically Based Didactic Reconstruction : A Research Framework for Integrating History of Science in Science Classrooms ».
- (2015b). « Une reconstruction historique du concept macroscopique de pression atmosphérique pour la préparation d'un dossier documentaire utilisable en classe de sciences physiques. » In : *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie* 978, p. 1369–1394. URL : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=22117.
- HÖTTECKE, Dietmar, Andreas HENKE et Falk RIESS (2010). « Implementing History and Philosophy in Science Teaching : Strategies, Methods, Results and Experiences from the European HIPST Project ». In : *Science & Education* 21.9, p. 1233–1261. ISSN : 0926-7220, 1573-1901. DOI : 10.1007/s11191-010-9330-3. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11191-010-9330-3> (visité le 15/09/2020).

- HOUDET, Yohann (2015). *Newton et la décomposition de la lumière blanche*.
URL : <https://www.pedagogie.ac-nantes.fr/physique-chimie/enseignement/sequences/newton-et-la-decomposition-de-la-lumiere-blanche-916996.kjsp?RH=PHY> (visité le 21/09/2020).
- IRWIN, Allan R. (2000). « Historical Case Studies : Teaching the Nature of Science in Context ». In : *Science Education* 84.1, p. 5–26. ISSN : 0036-8326. DOI : 10.1002/(SICI)1098-237X(200001)84:1<5::AID-SCE2>3.0.CO;2-0.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, María Pilar et Blanca PUIG (2012). « Argumentation, Evidence Evaluation and Critical Thinking ». In : *Second International Handbook of Science Education*. Sous la dir. de Barry J. FRASER, Kenneth TOBIN et Campbell J. MCROBBIE. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 1001–1015. ISBN : 978-1-4020-9040-0 978-1-4020-9041-7. DOI : 10.1007/978-1-4020-9041-7_66. URL : http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-9041-7_66 (visité le 03/08/2020).
- KALINOWSKI, Marc (1990). « Le calcul du rayon céleste dans la cosmographie chinoise ». In : *Revue d'histoire des sciences* 43.1, p. 3–34. ISSN : 0151-4105. DOI : 10.3406/rhs.1990.4154. URL : https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1990_num_43_1_4154 (visité le 26/08/2020).
- KARIOTOGLOU, P. et D. PSILLOS (1993). « Pupils' Pressure Models and Their Implications for Instruction ». In : *Research in Science & Technological Education* 11.1, p. 95–108. ISSN : 0263-5143, 1470-1138. DOI : 10.1080/0263514930110109. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0263514930110109> (visité le 17/08/2020).
- KIPNIS, Nahum (2001). « Scientific Controversies in Teaching Science : The Case of Volta ». In : *Science and Education* 10.1/2, p. 33–49. ISSN : 09267220. DOI : 10.1023/A:1008760521211. URL : <http://link.springer.com/10.1023/A:1008760521211> (visité le 22/08/2020).
- KOYRÉ, A. (1960). « Le De Motu Gravium de Galilée. De l'expérience imaginaire et de son abus. » In : *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* 13.3, p. 197–245. ISSN : 0048-7996. DOI : 10.3406/rhs.1960.3854. URL : https://www.persee.fr/doc/rhs_0048-7996_1960_num_13_3_3854 (visité le 21/09/2020).
- KUBLI, Fritz (2001). « Galileo's Jumping-Hill' Experiment in the Classroom - A Constructivist's Analysis ». In : *Science and Education* 10.1/2, p. 145–148. ISSN : 09267220. DOI : 10.1023/A:1008769404198. URL : <http://link.springer.com/10.1023/A:1008769404198> (visité le 22/08/2020).
- KUHN, Thomas Samuel (1972). *La structure des révolutions scientifiques*. Traduit de l'anglais américain : "The structure of scientific revolutions" (University of Chicago Press, 2nd enlarged ed., 1970). - Autre tirage :

1976. Paris, France : Flammarion éditeur. 246 p. ISBN : 978-2-08-210181-3.
- LAUGIER, André et Alain DUMON (2000). « Histoire Des Sciences et Modélisation de La Transformation Chimique En Classe de Seconde. » In : *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie* 94, p. 1261–1284. URL : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=11204.
- Le Courant Électrique Dans Les Solutions Aqueuses* (2014). URL : http://www4.ac-nancy-metz.fr/clg-cassin-eloyes/Disciplines/Site_physique_chimie/Troisieme/Chapitre_C3/courant_ion.html (visité le 15/09/2020).
- LEFROU, Christine, Pierre FABRY et Jean-Claude POIGNET (2013). *Électrochimie - Concepts fondamentaux illustrés*. EDP Sciences. Grenoble Sciences. Les Ulis, France. ISBN : 978-2-7598-0966-0.
- LEVRINI, Olivia et al. (2017). « Understanding First-Year Students' Curiosity and Interest about Physics—Lessons Learned from the HOPE Project ». In : *European Journal of Physics* 38.2, p. 025701. ISSN : 0143-0807, 1361-6404. DOI : 10.1088/1361-6404/38/2/025701. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/38/2/025701> (visité le 03/08/2020).
- LOCKHEAD, Jack et Robert DUFRESNE (1989). « Helping Students Understand Difficult Science Concepts through the Use of Dialogues with History ». In : *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*. Sous la dir. de Don Emil HERGET. Florida State University, Tallahassee, p. 221–229.
- LYTHCOTT, Jean (1985). « “Aristotelian” Was given as the Answer, but What Was the Question ? » In : *American Journal of Physics* 53.5, p. 428–432. ISSN : 0002-9505, 1943-2909. DOI : 10.1119/1.14193. URL : <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.14193> (visité le 16/08/2020).
- MARTINAND, Jean-Louis (1993). « Histoire et Didactique de La Physique et de La Chimie : Quelles Relations ? » In : *Didaskalia* 2. ISSN : 1250-0739. DOI : 10.4267/2042/20187. URL : <http://hdl.handle.net/2042/20187> (visité le 15/08/2020).
- MAURINES, Laurence et Daniel BEAUFILS (2011). « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique ». In : *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies* 3 (3), p. 271–305. ISSN : 2110-6460. URL : <http://journals.openedition.org/rdst/444> (visité le 26/08/2020).
- MAURINES, Laurence, Daniel BEAUFILS et Claude CHAPUIS (2009). « Travailler l'image de La Nature de La Science et de l'activité Scientifique

- Grâce à l'histoire Des Sciences ». In : *Actes Des 6e Journées Scientifiques de l'ARDIST*. Nantes.
- MAURINES, Laurence, Daniel BEAUFILS et Sabrina NAIT BOUDA (2013). « Histoire Des Sciences et Image de La Science ». In : *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie* 958, p. 1017–1030. URL : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21578.
- MAURINES, Laurence et Arnaud MAYRARGUE (2007). « Utiliser l'histoire de l'optique Dans l'enseignement : Pourquoi ? Comment ? » In : Paris 2007 - Paris de ScienceS. Paris. URL : https://paris2007.udppc.asso.fr/actes/index.php?page=fiche_ev&num_ev=185.
- MCPECK, John (1990). « Critical Thinking and Subject Specificity : A Reply to Ennis ». In : *Educational Researcher* 19.4, p. 10–12. ISSN : 0013-189X, 1935-102X. DOI : 10.3102/0013189X019004010. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.3102/0013189X019004010> (visité le 01/08/2020).
- (2017). *Critical Thinking and Education*. ISBN : 978-1-138-20902-2 978-1-315-45789-5 978-1-138-20685-4 978-1-315-46369-8.
- MEN (1999). « Physique-Chimie. Classe de Seconde. Nouveau Programme Applicable à Compter de l'année Scolaire 2000-2001 ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (hors-série n6 du 12 août 1999). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/BoAnnexes/1999/hs6/hs6vol2.pdf>.
- (2010a). « Enseignement Commun. Programme d'enseignement de Physique-Chimie En Classe de Seconde Générale et Technologique ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n4 du 29 avril 2010). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/2010/special04/mene1007262a.htm>.
- (2010b). « Programme d'enseignement Spécifique de Physique-Chimie En Classe de Première de La Série Scientifique ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n9 du 30 septembre 2010). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/2010/special09/mene1019556a.htm>.
- (2011). « Enseignement Spécifique et de Spécialité de Physique-Chimie de La Série Scientifique - Classe Terminale ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n8 du 13 octobre 2011). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/11/Special8/MENE1119475A.htm>.
- (2019a). « Les Mathématiques de l'enseignement Scientifique. La Forme de La Terre et Les Mesures à La Surface de La Terre ». In : *Eduscol*. URL : https://cache.media.eduscol.education.fr/file/les_mathematiques_de_l_ES/34/5/RA19_Lycee_G_1_MATH_Enseignement-scientifique_MesureSurfaceTerre_1149345.pdf.

- MEN (2019b). « Programme de l'enseignement de Physique-Chimie de La Classe de Seconde Générale et Technologique ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n1 du 22 janvier 2019). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special1/MENE1901634A.htm>.
- (2019c). « Programme de l'enseignement de Spécialité de Physique-Chimie de La Classe Terminale de La Voie Générale ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n8 du 25 juillet 2019). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm>.
- (2019d). « Programme d'enseignement de Spécialité de Physique-Chimie de La Classe de Première de La Voie Générale ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n1 du 22 janvier 2019). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special1/MENE1901635A.htm>.
- (2019e). « Programme d'enseignement Scientifique de La Classe de Première de La Voie Générale ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n1 du 22 janvier 2019). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special1/MENE1901573A.htm>.
- (2019f). « Programme d'enseignement Scientifique de La Classe Terminale de La Voie Générale ». In : *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale* (spécial n8 du 25 juillet 2019). URL : <https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921241A.htm>.
- MERLE, Hélène (2002). « Histoire Des Sciences et Sphéricité de La Terre, Compte-Rendu d'innovation ». In : *Didaskalia* 20, p. 115–136. URL : http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/didaskalia/INRP_RD020_5.pdf.
- MONK, Martin et Jonathan OSBORNE (1997). « Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum : A Model for the Development of Pedagogy ». In : *Science Education* 81, p. 405–424. DOI : 10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4<405::AID-SCE3>3.0.CO;2-G.
- NEWTON, Isaac (1671). « A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge ; Containing His New Theory about Light and Colors : Sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72 ; in Order to Be Communicated to the R. Society ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 6.80, p. 3075–3087. ISSN : 0261-0523, 2053-9223. DOI : 10.1098/rstl.1671.0072. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1671.0072> (visité le 21/09/2020).
- PROUST, Christine (2007). *Tablettes mathématiques de Nippur*. Istanbul, Turquie, France : Institut français d'études anatoliennes G. Dumézil. 356 ; xlix. ISBN : 978-2-906053-92-2.
- ROZIER, Sylvie et Laurence VIENNOT (1991). « Students' Reasonings in Thermodynamics ». In : *International Journal of Science Education* 13.2,

- p. 159–170. ISSN : 0950-0693, 1464-5289. DOI : 10.1080/0950069910130203. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0950069910130203> (visité le 17/08/2020).
- RUDGE, David W. et Eric M. HOWE (2004). « Incorporating HISTORY into the Science Classroom ». In : *The Science Teacher* 71.9, p. 52–57. JSTOR : 24155560.
- SALTIEL, Édith et Laurence VIENNOT (1985). « What Do We Learn from Similarities between Historical Ideas and the Spontaneous Reasoning of Students ? » In : *The Many Faces of Teaching and Learning Mechanics*. GIREP. Sous la dir. de LINJSE. Utrecht.
- SÉRÉ, Marie-Geneviève (1982). « A Study of Some Frameworks Used by Pupils Aged 11 to 13 Years in the Interpretation of Air Pressure ». In : *European Journal of Science Education* 4.3, p. 299–309. ISSN : 0140-5284. DOI : 10.1080/0140528820040309. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0140528820040309> (visité le 17/08/2020).
- SHARMA, Manjula D et al. (2014). « Student Evaluation of Research Projects in a First-Year Physics Laboratory ». In : *European Journal of Physics* 35.2, p. 025004. ISSN : 0143-0807, 1361-6404. DOI : 10.1088/0143-0807/35/2/025004. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/35/2/025004> (visité le 03/08/2020).
- TREINER, Jacques (2002). « Faire des programmes : le cas de la physique ». In : *Communications* 72.1, p. 219–232. ISSN : 0588-8018. DOI : 10.3406/comm.2002.2106. URL : https://www.persee.fr/doc/comm_0588-8018_2002_num_72_1_2106 (visité le 26/08/2020).
- TYTLER, Russell (1998). « Children's Conceptions of Air Pressure : Exploring the Nature of Conceptual Change ». In : *International Journal of Science Education* 20.8, p. 929–958. ISSN : 0950-0693, 1464-5289. DOI : 10.1080/0950069980200803. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0950069980200803> (visité le 17/08/2020).
- VARENT, Charlotte de (2018). « Pluralité Des Concepts Liées Aux Unités de Mesure : Liens Entre Histoire Des Sciences et Didactique, Le Cas de l'aire Du Carré Dans Une Sélection de Textes Anciens ». Sous la direction de Christine Proust et de Michèle Artigue. Soutenue le 27-10-2018, à Sorbonne Paris Cité, dans le cadre de Ecole doctorale Economies, Espaces, Sociétés, Civilisations : pensée critique, politique et pratiques sociales (Paris), en partenariat avec Université Paris Diderot - Paris 7 (1970-2019) (établissement de préparation), Laboratoire Sciences philosophie histoire (Paris) (laboratoire) et de Laboratoire de didactique André Revuz (Paris) (laboratoire). These de doctorat. Sorbonne Paris Cité. URL : <https://www.theses.fr/2018USPCC106> (visité le 19/07/2020).

- VERRET, Michel (1975). *Le temps des études*. Lille, France : Atelier reproduction des thèses. 400 p. ISBN : 978-2-252-01690-9.
- VIENNOT, Laurence (1979). « Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics ». In : *European Journal of Science Education* 1.2, p. 205–221. ISSN : 0140-5284. DOI : 10.1080/0140528790010209. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0140528790010209> (visité le 16/08/2020).
- VIENNOT, Laurence et Nicolas DÉCAMP (2016a). « Co-Development of Conceptual Understanding and Critical Attitude : Toward a Systemic Analysis of the Survival Blanket ». In : *European Journal of Physics* 37.1, p. 015702. ISSN : 0143-0807, 1361-6404. DOI : 10.1088/0143-0807/37/1/015702. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/37/1/015702> (visité le 14/06/2020).
- (2016b). « Conceptual and Critical Development in Student Teachers : First Steps towards an Integrated Comprehension of Osmosis. » In : *International Journal of Science Education* 38.14, p. 2197–2219. DOI : 10.1080/09500693.2016.1230793. URL : <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1230793> (visité le 14/06/2020).
- (2018a). « Activation of a Critical Attitude in Prospective Teachers : From Research Investigations to Guidelines for Teacher Education ». In : *Physical Review Physics Education Research* 14.1, p. 010133. DOI : 10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010133. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010133> (visité le 08/06/2020).
- (2018b). « The Transition towards Critique : Discussing Capillary Ascension with Beginning Teachers ». In : *European Journal of Physics* 39.4, p. 045704. ISSN : 0143-0807. DOI : 10.1088/1361-6404/aab33f. URL : <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aab33f> (visité le 14/06/2020).
- (2019). *L'Apprentissage de la critique. Développer l'analyse critique en physique*. 1re édition. Enseigner les sciences. EDP Sciences / UGA Éditions. 204 p. ISBN : 978-2-7598-2355-0. URL : </produit/1084/9782759823833/LApprentissage%20de%20la%20critique> (visité le 14/06/2020).
- (2020). *Developing Critical Thinking in Physics : The Apprenticeship of Critique*. T. 7. Contributions from Science Education Research. Cham : Springer International Publishing. ISBN : 978-3-030-43772-5 978-3-030-43773-2. DOI : 10.1007/978-3-030-43773-2. URL : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-43773-2> (visité le 02/08/2020).
- WILLINGHAM, Daniel T. (2007). « Critical Thinking : Why Is It So Hard to Teach? » In : *American Educator* 31, p. 8–19. URL : https://www.aft.org/sites/default/files/periodicals/Crit_Thinking.pdf.

WORLD BANK (2018). *World Development Report 2019 : The Changing Nature of Work*. The World Bank. ISBN : 978-1-4648-1328-3 978-1-4648-1356-6. DOI : 10.1596/978-1-4648-1328-3. URL : <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-1-4648-1328-3> (visité le 30/07/2020).