



HAL
open science

L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique

C. de Hosson

► **To cite this version:**

C. de Hosson. L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2011. tel-00655594

HAL Id: tel-00655594

<https://theses.hal.science/tel-00655594>

Submitted on 31 Dec 2011

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

L'histoire des sciences, un laboratoire pour la recherche en
didactique et l'enseignement de la physique

Par Cécile de HOSSON

Soutenue le 12 décembre 2011, devant le jury constitué de :

Michèle ARTIGUE, professeure émérite, Université Paris Diderot (France) : Examinatrice
Jean-Luc DORIER, professeur, Université de Genève (Suisse) : Rapporteur
Cécile FERRARI, professeure, Université Paris Diderot (France) : Rapporteur
Rémy MOSSERI, directeur de recherche, CNRS (France) : Rapporteur
Marisa MICHELINI, professeure, Università di Udine (Italie) : Examinatrice
André TIBERGHEN, directrice de recherche honoraire, CNRS (France) : Présidente

Sommaire

Résumé des recherches conduites entre 2004 et 2011.....	6
1. L'histoire des sciences, un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique.....	7
2. Contribution à l'exploration des questions liées à l'apprentissage de la relativité restreinte. La recherche en didactique dans le projet EVEILS.	8
Exposé synthétique des recherches : L'histoire des sciences, un laboratoire.....	12
1. Introduction	12
2. Etude critique d'utilisations scolaires d'épisodes historiques.....	17
2.1. Analyse de l'activité de mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène ».....	17
2.2. Etude critique de l'utilisation scolaire des expériences barométriques de Torricelli et de Pascal	23
3. Apprendre la physique à partir de son histoire : définition d'un cadre.....	30
3.1. Eléments d'analyse de séquences d'enseignement fondées sur l'histoire des sciences dans la recherche en didactique	30
3.2. Un cadre pour une reconstruction didactique des savoirs	33
4. Deux exemples de reconstruction	37
4.1. Reconstruction didactique de la conservation du mouvement conçue à partir du Dialogue sur les deux grands systèmes du monde de Galilée.	37
4.2. Reconstruction didactique d'une procédure de mesure du périmètre de la Terre	40
5. Conclusion	43
6. Bibliographie	48
Perspectives	60
1. La recherche en didactique dans le projet EVEILS.....	60
2. EVEILS, la suite : approcher le concept de gravitation	67
3. Le rôle des graphiques dans la compréhension des concepts en jeu en cinématique relativiste.	68

A noter : Dans cette note de synthèse, lorsque nous réfèrerons aux résultats des recherches ayant donné lieu à publication, nous renverrons le lecteur à ces recherches en indiquant explicitement [Article n] où n indique le numéro de la publication concernée.

- [Article 1]** de Hosson C. & Kaminski W. (2007). Historical controversy as an educational tool. Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the “Dialogue on the ways that vision operates”, *International Journal of Science Education*, 29 (5), 617-642.
- [Article 2]** Décamp N. & de Hosson C. (2010). Implementing Eratosthenes’ discovery in the classroom: some educational cares, *Science and Education* (published on line, august 11th 2010: DOI: 10.1007/s11191-010-9286-3).
- [Article 3]** de Hosson C. (2011). Une reconstruction historique du concept de pression atmosphérique. Disponible sur : <http://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00608885/fr/>.
- [Article 4]** de Hosson C. & Caillarec B. (2009). Students’ ideas about Blaise Pascal experiment at the Puy de Dôme Mountain. *Latin American Journal of Physics Education*, 3 (2), 207-213.
- [Article 5]** de Hosson C. (2011). Una controversia histórica al servicio de una situación de aprendizaje: una reconstrucción didáctica basada en *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* de Galileo, *Enseñanza de las ciencias*, 29 (1), 115-126.
- [Article 6]** de Hosson C., Kermen I. & Parizot E. (2010). Exploring students’ understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity, *European Journal of Physics*. 31 (6), 1527-1538.

Résumé des recherches conduites entre 2004 et 2011

Résumé des recherches conduites entre 2004 et 2011

Depuis 2004, mes travaux se sont développés au sein de deux axes thématiques assez distincts de la recherche en didactique de la physique : le premier s'inscrit dans la continuité de ma thèse et se pose comme une contribution à l'exploration des liens entre histoire de la physique, recherche en didactique et enseignement ; le second concerne un domaine de la recherche en didactique encore peu exploré et vise à éclairer quelques questions liées à l'apprentissage de la cinématique relativiste. Ce second axe de recherche s'est développé à la suite de l'obtention d'un contrat ANR-blanc en mai 2009 (ANR EVEILS¹) dont la visée est le développement de scénarios d'apprentissage adaptés à un environnement virtuel immersif 3D.

Derrière l'apparente disjonction de ces deux orientations, se cache un objectif commun. Dans les deux cas en effet, les difficultés des élèves (et des étudiants) et les raisonnements qu'ils mettent en œuvre pour résoudre telle ou telle situation physique constituent des éléments d'orientation pour l'élaboration de scénarios didactiques qui, dans un cas, vont se donner pour but d'aborder la physique par son histoire, dans l'autre cas, vont permettre d'approcher certains aspects de la physique relativiste (non-simultanéité des événements, déformation spatiale des objets...) à travers l'utilisation d'un environnement virtuel immersif 3D. Des questions liées à l'évaluation de l'impact de la mise en œuvre de ces scénarios sur l'apprentissage émergent dans un cas comme dans l'autre.

Malgré tout, et par souci de clarté, j'ai décidé d'organiser cette note de synthèse en deux parties disjointes : la partie « exposé synthétique des recherches » rend compte exclusivement des travaux que j'ai menés dans le contexte des liens entre histoire des sciences, recherche en didactique et enseignement ; la partie « perspectives » décrit quant à elle l'essentiel des résultats obtenus dans le contexte de l'ANR EVEILS. Ce choix d'organisation exprime le fait que les questions associées à l'enseignement et à l'apprentissage de la physique relativiste (relativité restreinte) guideront l'essentiel de mes recherches dans les années à venir.

¹ EVEILS : Environnement Virtuel pour l'Education et l'Illustration Scientifiques (ANR blanc 08-215, resp. E. Parizot, laboratoire APC, Université Paris Diderot). Cette ANR est structurée en trois 3 lots (workpackage ou WP) ; je suis responsable du lot n°1 (WP1 : Définition des usages et validation).

1. L'histoire des sciences, un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique.

C'est au milieu du 19^e siècle qu'apparaît pour la première fois dans les textes législatifs, une référence explicite à l'histoire des sciences dans l'enseignement au niveau secondaire. Cette référence se retrouvera ensuite régulièrement dans les programmes de sciences physiques sous des formes plus ou moins incitatives. Il n'est pas question ici de faire l'histoire de l'histoire des sciences dans l'enseignement français. Nous renvoyons pour cela au remarquable « aperçu » historico-critique publié en 1984 par Nicole Hulin qui retrace l'histoire de l'intervention historique dans l'enseignement scientifique français depuis cent cinquante ans (Hulin 1984). La pertinence de l'insertion historique pour l'apprentissage scientifique apparaît régulièrement discutée, et même, remise en cause. Les réserves portent surtout le risque de voir apparaître en classe une « pseudo-histoire », terme utilisé par le physicien Henri Bouasse pour désigner la succession de « portraits », de « biographies » et « d'extraits », forme ordinaire de la référence historique du cours de sciences dont Bouasse réfute la portée. Nous pourrions ajouter à ces réserves que la place de l'histoire des sciences dans la formation des enseignants demeure très insuffisante. En outre, les outils pédagogiques disponibles sont à la fois peu nombreux et parfois peu appropriés. L'analyse que nous avons faite de l'activité rituelle visant à faire reproduire aux élèves la procédure de la mesure du périmètre terrestre selon la méthode dite « d'Eratosthène » [Article 2] révèle certaines carences que nous avons retrouvées dans la forme prise par l'expérience barométrique de Torricelli dans le contexte de l'apprentissage de la pression [article 4]. Malgré tout, la référence historique demeure et les programmes scientifiques actuels des classes secondaires lui accordent une place non-négligeable. Notre travail s'inscrit dans ce contexte et se pose comme une réponse aux incitations institutionnelles. Il vise la création d'un cadre prescriptif d'élaboration de séquences d'enseignement incluant une dimension historique et se donnant pour but, non pas d'approcher la nature et les méthodes de la science, mais de favoriser l'apprentissage d'un concept ou d'une loi scientifique.

Directement adaptée de la recherche conduite par Dorier dans le contexte de la recherche en didactique des mathématiques (Dorier 2006), notre démarche repose sur l'établissement d'une dialectique entre l'histoire des sciences et la recherche en didactique de la physique. Elle consiste dans un premier temps à repérer et à analyser les difficultés associées à l'enseignement d'un objectif de connaissance défini par les programmes scolaires par le biais d'une enquête didactique. Dans un second temps, une enquête historique (fondée sur l'analyse de textes historiques originaux) est mise en regard de l'enquête didactique afin d'éclairer certaines difficultés d'élèves (ou d'étudiants) préalablement mises à jour. Dans les cas que nous avons étudiés (optique géométrique, statique des fluides, mécanique newtonienne), il apparaît que des difficultés d'élèves font parfois écho à des difficultés rencontrées par les savants au cours de l'histoire. Il s'agit de tirer profit de cette proximité pour structurer des parcours d'apprentissage à partir d'idées qui, dans l'histoire des sciences se sont révélées fructueuses en termes d'avancées conceptuelles (idées-clés). Cette structuration procède d'une reconstruction spécifique (une reconstruction « didactique ») dans laquelle les idées-clés historiques sont réorganisées pour répondre aux contraintes didactiques de la classe de physique.

Depuis notre travail de reconstruction inspiré de l'histoire du mécanisme optique de la vision **[article 1]**, nous avons conçu deux parcours d'apprentissage selon les orientations fixées par notre cadre. Le premier concerne l'apprentissage du principe de conservation du mouvement **[article 5]**, le second, la géométrisation de la propagation des rayons issus du Soleil **[article 2]**. Dans tous les cas, les reconstructions didactiques apparaissent assez distinctes des reconstructions historiques de référence : les prémisses historiques, ces hypothèses sur lesquelles semblent fondées les découvertes au sein de la sphère historique, se présentent comme des obstacles à l'apprentissage et par là-même, comme les savoirs à construire ; à l'inverse, les connaissances acquises des élèves (et conformes aux savoirs de référence) constituent l'aboutissement du cheminement historique. Le nombre limité d'exemples actuellement traités ne nous permet de tirer aucune conclusion quant au caractère généralisateur de notre cadre. De fait, l'une des perspectives de cette recherche est d'étendre sa mise à l'épreuve à de nouveaux savoirs afin de vérifier la viabilité et l'opérationnalité de nos recommandations. Quoiqu'il en soit, dans le paysage des recherches en didactique des sciences, cette proposition à visée prescriptive apparaît pour l'essentiel, novatrice.

2. Contribution à l'exploration des questions liées à l'apprentissage de la relativité restreinte. La recherche en didactique dans le projet EVEILS.

EVEILS est un projet pluridisciplinaire associant physiciens, spécialistes de Réalité Virtuelle et didacticiens de la physique qui vise à explorer le potentiel innovant de la Réalité Virtuelle (RV) au moyen d'un démonstrateur immersif en trois dimensions (CAVE, Cave Automatic Virtual Environment) permettant de confronter un étudiant (ou toute personne intéressée) à des phénomènes physiques inaccessibles dans le monde ordinaire². L'un des objectifs principaux du projet EVEILS consiste à déterminer les modifications cognitives et les avantages éducatifs procurés par une immersion dans l'environnement virtuel. Cet aspect éducatif confère à EVEILS un caractère tout à fait spécifique parmi les programmes de recherche consacrés aux simulations informatiques dans le domaine de la Réalité Virtuelle. Elle offre en outre à la recherche en didactique un terrain d'exploration inédit, tant par la spécificité du media qu'elle utilise que par l'originalité des apprentissages visés.

La structure relativiste de l'espace-temps ne peut pas être appréhendée directement par la perception humaine, c'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer la Réalité Virtuelle au domaine de la relativité restreinte en privilégiant la compréhension des concepts relativistes dont les effets sont rendus perceptibles par la Réalité Virtuelle. L'utilisation de l'environnement virtuel est sous-tendue par le développement de scénarios d'apprentissage dédiés. Pour développer ces scénarios, nous avons adopté le cadre de l'Ingénierie Didactique (Artigue, 1988) qui implique une analyse préalable des contraintes cognitives et des difficultés liées à un concept donné. Dans cette perspective nous avons exploré la compréhension qu'ont les étudiants de situations relativistes **[article 6]**. Cette exploration

² Espace physique dans lequel un utilisateur libre de se mouvoir est visuellement confronté à des objets virtuels grandeur nature en trois dimensions générés par une plate-forme logicielle complexe. La CAVE utilisée dans le projet EVEILS est localisée au LIMSI (UPR 3251 du CNRS, Orsay).

nous a permis de définir plus précisément les objectifs à assigner aux scénarios à implémenter. Ceux-ci, conçus sur la base de l'immersion d'un utilisateur au sein d'un jeu de billard « relativiste » (Doat *et al.* 2011), sont actuellement en cours d'évaluation.

Ce travail a ouvert la voie à de nouvelles perspectives de recherche qui présentent l'originalité de se situer dans un domaine encore peu exploré par la recherche en didactique actuelle : l'enseignement de la physique dite « moderne ». L'une d'elle, impliquant didactique des mathématiques et didactique de la physique, concerne l'impact de l'utilisation des représentations graphiques (en particulier celles créées par Minkowski au début du 20^e siècle) sur l'appropriation de concepts relativistes³.

La compréhension des effets gravitationnels à grande échelle constitue la seconde étape du projet EVEILS et définit l'une des orientations des recherches que nous comptons développer dans les années à venir.

³ Thèse de Laurent Moutet, co-direction : C. de Hosson & A. Kuzniak (LDAR, Université Paris Diderot-Paris 7), première inscription : septembre 2010.

Exposé synthétique des recherches

Exposé synthétique des recherches : L'histoire des sciences, un laboratoire...

1. Introduction

L'intérêt de l'histoire des sciences pour l'enrichissement de l'éducation scientifique est mis en avant par la majorité des acteurs du monde scientifique et éducatif actuel. En France, depuis plusieurs années, les enseignants de sciences des collèges et des lycées se voient incités à faire une place de plus en plus importante à l'information historique au sein de leurs cours. Selon les programmes actuels de collège « la perspective historique donne une vision cohérente des sciences et des techniques et de leur développement conjoint. Elle permet de présenter les connaissances scientifiques comme une construction humaine progressive et non comme un ensemble de vérités révélées » (BOEN spécial n°6 du 28 août 2008, p. 1). Dans les nouveaux programmes de lycées, la volonté affichée d'une présentation dynamique et culturelle de la science pose l'histoire des sciences comme un moyen de réconcilier les élèves avec la science. En première S, « l'enseignant peut utiliser l'approche historique comme démarche didactique destinée à mettre la science en contexte et en culture »⁴ (Programme de physique-chimie pour la classe de première S, p. 4). En classe de seconde, la « mise perspective historique » (en tant qu'« histoire de la construction de la connaissance scientifique ») est posée comme une voie à privilégier pour approcher la nature et « l'universalité » des lois et des modèles et devient le témoin des qualités humaines sous-jacentes à l'activité scientifique : « Faire connaître à l'élève l'histoire de la construction de la connaissance scientifique est source d'inspiration pour la liberté intellectuelle, l'esprit critique et la volonté de persévérer. Elle est également une école d'humilité et de patience » (BOEN spécial n°4 du 29 avril 2010, p. 1-2). D'une manière assez générale, les rédacteurs des programmes scolaires voient dans l'apport d'information historique, d'une part une opportunité d'approcher la nature de la science avec les élèves, et d'autre part une façon de rendre l'apprentissage scientifique plus attractif et plus motivant⁵.

Ce choix fait écho aux résultats de certaines recherches en didactique. Plusieurs études comparatives montrent en effet que la vision que les élèves ont de la science se trouve modifiée lorsque l'enseignement s'ouvre à l'histoire des sciences. L'utilisation de matériaux historiques telle que la présentation de controverses historiques permettrait, en outre, de participer au développement de l'esprit critique des élèves (Allchin *et al.* 1999, Irwin 2000,

⁴ Dans cette phrase, l'adjectif « didactique » est vraisemblablement utilisé dans le sens courant de « conçu pour des fins d'enseignement ».

⁵ Le paradigme pédagogique de « la démarche d'investigation » prônée depuis 2002 par les Instructions Officielles procède sans doute d'une volonté identique (voir à ce sujet Mathé *et al.* 2008). Ajoutons que les orientations des programmes français sur ce point ne se distinguent guère des curriculums internationaux.

Albe 2007, Höttecke 2010). Enfin, la dimension historique, parce qu'elle offrirait aux élèves une vision plus dynamique et plus juste de la science, favoriserait une plus grande implication de ceux-ci dans les activités d'apprentissage (Matthews 1989, Solomon *et al.* 1992, Matthews 1994, Galili & Hazan 2001). Il y aurait donc une relation féconde entre approche historique et motivation des élèves pour apprendre les sciences.

Pour autant, les obstacles à la mise en œuvre de projets à caractère historique au sein de la classe de sciences (et en particulier au sein de la classe de physique) sont encore nombreux. En France, les enseignants du secondaire ne sont pas (ou peu) formés à l'histoire des sciences *per se*, et encore moins à la façon d'utiliser le matériau historique en classe. Les ressources pédagogiques disponibles demeurent assez rares et même lorsqu'elles existent, elles s'avèrent parfois peu adaptées. En outre, les plaidoyers institutionnels tendent à placer l'apport d'information historique en complément du cours traditionnel dont l'organisation demeure, elle, indépendante de l'organisation historique des idées auxquelles il renvoie. Un tel choix persiste à poser l'histoire des sciences comme la « cerise (...) sur le gâteau de l'enseignement » (Guedj & Dusseau 1999, p. 996), comme un « plus » souvent considéré comme chronophage par les enseignants, et non comme un élément constitutif de celui-ci.

Compte tenu de ces difficultés, faire le pari d'une plus grande présence de l'histoire des sciences en classe, c'est peut-être faire en sorte que le matériau historique devienne un *media*⁶ pour l'acquisition des savoirs scolaires. Cette posture vis-à-vis de l'histoire des sciences est quelque peu différente de celle des programmes scolaires. Dans un cas on attend de l'histoire des sciences qu'elle contribue à l'apprentissage des concepts et des lois à enseigner, dans l'autre, on prévoit qu'elle renseigne les élèves sur la nature de la science et qu'elle modifie par là-même l'image véhiculée par l'enseignement traditionnel. Si nous pensons à la suite de Gohau qu'il est difficile (et pas nécessairement souhaitable) de faire acquérir simultanément aux élèves un savoir sur la science (ou lié à la nature de la science) et un savoir proprement scientifique (Gohau 2002), il nous semble en revanche possible de favoriser l'acquisition de savoirs scientifiques en utilisant la fertilité du matériau historique. Les travaux que nous menons depuis 2004 s'inscrivent dans cette perspective et ont pour objet la création d'un cadre unificateur d'élaboration de séquences d'enseignement dans lesquelles l'information historique devient un outil d'apprentissage des savoirs scientifiques. Cet engagement s'inscrit dans la droite ligne de notre thèse (2001-2004) qui avait pour objet la construction et l'évaluation d'une séquence d'enseignement d'optique élémentaire à partir d'éléments d'histoire du mécanisme optique de la vision (de Hosson 2004).

Au cours de cette recherche, nous avons conçu un parcours d'apprentissage visant la compréhension du rôle de la lumière dans la vision. En première approche, nous avons imaginé la possibilité d'un parcours calqué sur l'évolution historique des idées relatives à la vision. Les ressemblances que nous avons mises en évidence entre les idées des jeunes élèves et celles de certains protagonistes de la science grecque, en particulier le fait que les élèves, comme les savants grecques expliquent la vision soit dans un sens œil>objet, soit dans un sens objet>œil, (de Hosson & Kaminski, 2002) furent sans conteste à l'origine de ce

⁶ Le terme est ici utilisé au sens de support de mise à disposition d'une information.

projet (certes naïf) d'adaptation au contexte de l'apprentissage, des théories récapitulacionnistes de Haeckel⁷.

Ce projet a été assez vite anéanti par les résultats de l'enquête didactique que nous avons menée afin d'identifier plus finement les difficultés des élèves à propos du rôle de la lumière dans la vision. Selon les résultats de cette enquête, l'entrée de la lumière dans l'œil n'est reconnue (par les élèves interrogés) qu'au prix de la gêne qu'elle provoque, c'est-à-dire, dans des situations d'éblouissement. Or, dans de telles situations, la vision est difficile, voire impossible. Ce constat pose deux difficultés. D'abord elle conduit les élèves à affirmer que la vision des objets n'est possible que si la lumière n'entre pas dans l'œil ; ensuite, elle induit l'idée que les objets ordinaires, ordinairement éclairés ne renvoient pas la lumière qu'ils reçoivent. En d'autres termes, la vision d'un objet est possible si celui-ci est éclairé et si la lumière qui l'éclaire est suffisamment faible pour y « rester ». Le phénomène de l'éblouissement, tel qu'il se voit interprété par les élèves, constitue une difficulté majeure pour comprendre que la vision d'un objet résulte de l'entrée dans l'œil d'un observateur d'une partie de la lumière renvoyée par l'objet. A l'inverse, c'est l'observation de situations d'éblouissement qui semble être à l'origine de la première explication rationnelle du mécanisme de la vision. Elle est proposée par le savant arabe Ibn al-Haytham au 11^e siècle dans son *Kitab al Manazir*. Nous nous sommes donc trouvée face à une situation où un même fait d'observation (l'éblouissement) conduit d'un côté à conclure que la lumière est *stimulus* de la vue, et de l'autre au contraire, à imaginer que lorsque la lumière entre dans l'œil, la vision est impossible. Nous avons donc cherché à reconstruire le cheminement ayant permis à Ibn al-Haytham de passer de l'observation du phénomène de l'éblouissement à l'énoncé d'une première explication du mécanisme optique de la vision dans laquelle la lumière (en tant qu'objet indépendant) est partie prenante. Cette reconstruction, réalisée à partir de l'étude de textes de première main (en particulier le *Kitab al manazir* dans la traduction anglaise d'A.I. Sabra) s'est vue façonnée par la connaissance que nous avons des difficultés des élèves et nous a conduite à exhumer des éléments de l'histoire des théories de la vision minorés (voire ignorés) par les historiens. L'approche quantitative de la lumière construite par Ibn al Haytham à partir de l'analogie entre les effets de la lumière et la douleur est ainsi devenue l'idée centrale d'une séquence d'enseignement pour laquelle nous avons créé une ressource pédagogique : le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*. Il s'agit d'un dialogue fictif de type « galiléen » dans lequel trois personnages cheminent vers une explication rationnelle du mécanisme de la vision. Le dialogue s'ouvre sur une exposition de deux théories antagonistes (explicitement situées dans le contexte de la Grèce antique) dans lesquelles la vue est expliquée soit dans un sens œil>objet, soit dans un sens objet> œil. Il se poursuit vers une construction progressive du concept de lumière comme *stimulus* la

⁷ Dès le 18^e siècle, émerge chez certains philosophes des Lumières l'idée d'une homomorphie entre chronologie historique et élaboration des contenus propres à l'instruction. La correspondance qu'établit Condorcet entre le développement de l'espèce humaine et celui de l'individu le conduit à imaginer une organisation pédagogique des connaissances sur le modèle « des progrès de l'esprit humain ». Moins d'un siècle plus tard, Haeckel étend le cadre de sa théorie de la Récapitulation selon laquelle l'ontogénie récapitulerait la phylogénie et pose l'idée de l'existence d'un parallélisme entre la formation scientifique de l'individu et l'évolution historique de la science. Cette idée sera reprise par le directeur de l'enseignement secondaire, Charles Brunold puis par le physicien Paul Langevin au milieu du 20^e siècle puis abandonnée. De fait, l'organisation des savoirs scolaires n'a aujourd'hui que peu à voir avec l'ordonnement historique des savoirs savants auxquels ils se rapportent.

vue et suit l'organisation décrite Figure 1. L'utilisation de ce dialogue s'est avérée fructueuse en termes d'apprentissage (et de motivation) aussi bien dans le contexte d'entretiens d'apprentissage (Steffe & D'Ambrosio, 1996) avec des binômes d'élèves [article 1] que dans celui de situations réelles de classe de collège (Ternant 2006) et de primaire (de Hosson & Delaye 2009)⁸.

Pour autant, la séquence d'enseignement, née de ce double travail d'enquête didactique et historique procède d'une organisation spécifique à la classe qui diffère quelque peu du référent historique que nous avons utilisé (voir Figure 1). Sans nous écarter réellement de l'organisation chronologique du *Kitab al manazir*, nous avons ajouté des éléments dont la présence (justifiée par les résultats de notre enquête didactique) nous semblait nécessaire à un cheminement intellectuel sans heurt.

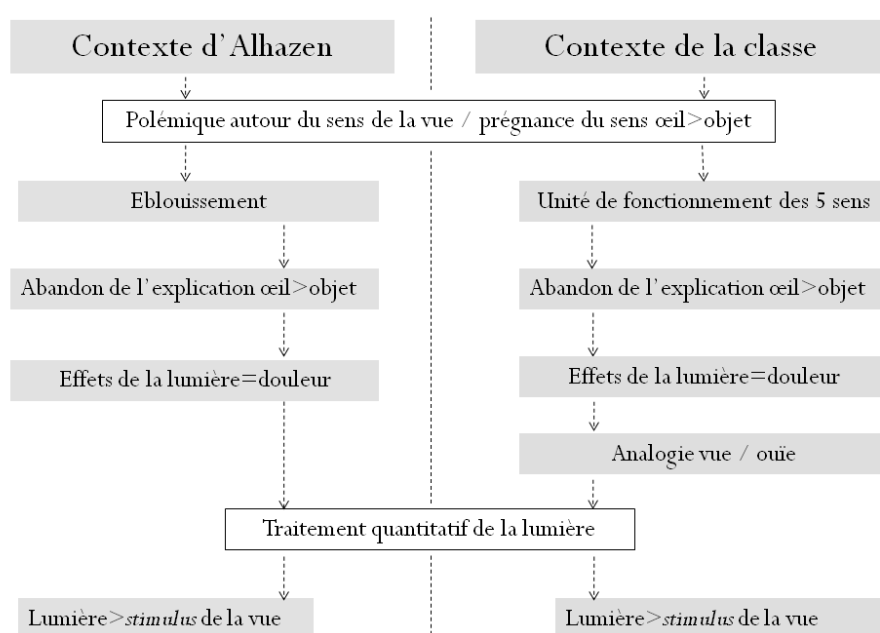


Figure 1: Organigramme mettant en perspective les étapes de la séquence d'enseignement conduisant à une première explication du mécanisme de la vision avec les étapes de la reconstruction historique des travaux d'Ibn al-Haytham (Alhazen) telle que nous l'avons conçue.

Interrogée comme élément de la *transposition didactique* (Verret 1975, Chevallard 1991), la légitimité des écarts ainsi mis en évidence entre la reconstruction historique des travaux d'Ibn al-Haytham et l'organisation de notre séquence d'enseignement apparaît largement justifiée. En effet, puisque l'étude et la prise en compte des contraintes propres au monde scolaire fondent la spécificité du projet de construction didactique, et par là-même, la spécificité de l'organisation des savoirs scolaires, il n'est pas étonnant que celle-ci se

⁸ Soulignons à cette occasion que le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* semble régulièrement utilisé en classe puisqu'il apparaît dans certaines fiches pédagogiques proposées par des chercheurs et des enseignants de collège. A titre d'exemple :

http://pegase.inrp.fr/activite.php?rubrique=1&id_theme=37&id_activite=402 (vérifié le 15 juillet 2011),
<http://www.irem.univ-montp2.fr/optionsciences/1demarche.pdf> (vérifié le 15 juillet 2011).

présente sous une forme quelque peu différente de l'organisation historique de référence. Dans le cas de notre séquence d'optique les processus ayant conduit à l'élaboration des savoirs ne sont pas gommés mais réexaminés et complétés à la lumière des difficultés des élèves.

Cette modalité de travail apparaît très différente de celle qui semble en général gouverner l'élaboration de séquences produites au sein de la sphère scolaire et qui entendent immerger les élèves dans le contexte historique d'une découverte. L'analyse des différentes formes scolaires prises par l'activité de mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène » exposée en première partie de ce mémoire vient illustrer cette affirmation. Nous montrons en effet que cette activité, telle que présentée dans le contexte scolaire, est construite sur la base d'approximations historiques, et qu'en ce sens, elle ne contribue que faiblement à l'enrichissement culturel des élèves. En outre, les apprentissages sous-tendus par cette activité sont à la fois peu nombreux et peu adaptés aux difficultés associées à la compréhension des principes géométriques qui fondent la mesure. Cette analyse est venue renforcer l'idée que l'élaboration d'une séquence d'enseignement utilisant l'histoire des sciences comme *media* d'apprentissage nécessite la prise en compte d'un certain nombre de contraintes parmi lesquelles le « profil conceptuel » des élèves (Chauvet 1996)⁹. En complément de cette analyse, l'attention portée au profil conceptuel d'étudiants confrontés à la présentation des expériences barométriques de Torricelli et de Pascal nous a conduite à remettre en cause l'exploitation scolaire traditionnelle de ces expériences dans le contexte de l'apprentissage du concept de pression atmosphérique.

L'explicitation des contraintes mentionnées plus haut est venue structurer un cadre conçu pour guider la création de séquences d'enseignement qui répondent à une double exigence : la préservation de l'historicité en jeu¹⁰ et la possible appropriation d'un savoir scientifique (un concept, une loi...) par les élèves. La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à la description de ce cadre, cadre dont la genèse inclut la réflexion que nous avons menée entre 2001 et 2004 lors de notre thèse et dont la création a procédé d'une volonté d'extension à d'autres objets de savoir scientifique. De manière opérationnelle, ce cadre définit les conditions qui vont déterminer le choix des éléments constitutifs de l'évolution d'un savoir donné à extraire de la sphère historique ; il précise également les stratégies permettant d'organiser ces éléments au sein d'une séquence d'enseignement qui réponde au double objectif précisé plus haut. Cette organisation à laquelle nous avons donné le nom de « reconstruction didactique » fait écho à des exigences spécifiques au monde de la classe de physique, et peut se trouver plus ou moins éloignée de l'organisation historique de référence.

Ce mémoire se termine par la présentation d'une mise en fonctionnement de notre cadre : nous résumons le processus d'élaboration de deux reconstructions didactiques destinées à

⁹ Nous reprenons ici l'expression dans le sens utilisé par Chauvet qui désigne l'état des connaissances et des modes de raisonnement d'une population donnée.

¹⁰ Il n'est pas inutile de rappeler que le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* qui structure notre séquence d'enseignement d'optique n'est pas un document historique. L'histoire des sciences y apparaît en filigrane et se présente sous la forme de références ponctuelles à des savants disparus ayant joué un rôle majeur dans la création du concept de lumière comme *stimulus* de la vue. Cette modalité ne favorise donc pas une mise en contact directe des élèves avec des éléments historiques

des élèves de collège et de lycée et portant sur la conservation du mouvement et la géométrisation de la propagation de la lumière du Soleil. Le choix des thématiques a été conditionné par le fait qu'il existe pour chacune d'elles des études didactiques précisant les difficultés associées à la compréhension des savoirs en jeu. Ces données ont constitué une base sur laquelle nous avons appuyé notre exploration historique. A ce critère de sélection s'ajoute un second : les deux thématiques font l'objet, dans le cadre scolaire, de traitements historiques. Elles apparaissent en effet comme le support d'activités dans lesquelles sont égrenés un certain nombre d'éléments d'information dits « historiques » mais dont on ignore finalement la portée en termes d'apprentissage. Nos séquences se posent comme une alternative à ces activités ; elles ambitionnent une mise en contact des élèves avec l'histoire des sciences plus effective (en termes de visibilité) et plus efficace (en termes d'apprentissage).

2. Etude critique d'utilisations scolaires d'épisodes historiques

Les orientations des programmes scolaires ont conduit les enseignants et les rédacteurs de manuels à concevoir quelques activités d'enseignement à partir d'éléments historiques. Dans cette perspective, la mesure de la Terre par la méthode d'Eratosthène s'est imposée comme un exemple emblématique d'une activité scolaire se donnant pour but de présenter aux élèves un aspect de la genèse de la construction de la connaissance scientifique, et de leur permettre en cela d'approcher certains traits spécifiques à la nature de la science.

2.1. Analyse de l'activité de mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène »¹¹.

Nous avons souhaité savoir dans quelle mesure cette activité remplissait les deux conditions énoncées ci-dessus. Pour cela, nous nous sommes intéressée à l'activité de reproduction de la mesure de la taille de la terre telle qu'elle apparaissait dans les programmes de physique-chimie de la classe de seconde jusqu'en 2010 : « En seconde, les élèves peuvent expérimentalement mesurer le rayon de la Terre (méthode d'Eratosthène) » (BOEN hors-série n°2 du 30 août 2001, p. 21)¹². Cette recommandation était accompagnée de deux fiches de travaux pratiques¹³. L'examen de ces fiches et de l'ensemble des manuels de sciences physiques de seconde nous a permis d'accéder aux formes prises par cette mesure au sein de la sphère scolaire et de les confronter aux témoignages historiques qui sont aujourd'hui disponibles (voir annexe 1). A la suite de cette confrontation nous avons pu caractériser les écarts entre la forme scolaire de la mesure de la circonférence de la Terre par Eratosthène et sa forme historique, ainsi que les choix des concepteurs des manuels et des documents d'accompagnement. Ceci nous a permis de discuter la pertinence de ces choix au regard des difficultés psycho-cognitives liées à cette activité.

¹¹ Ce travail a été réalisé en collaboration avec Nicolas Decamp, LDAR, Université Paris Diderot-Paris 7.

¹² Dans cette note, nous nous intéresserons spécifiquement aux programmes français de la classe de seconde ; pour une étude des programmes de primaire et de collège, nous renvoyons le lecteur à de Hosson & Décamp (2011).

¹³ Il s'agit de deux fiches intitulées « TP Eratosthène » (1) et (2) des *Documents d'accompagnement des programmes de physique de la classe de seconde*, MEN, 2000, 43-46.

L'ouvrage écrit par Ératosthène (276-194 av. J.C.) intitulé *Sur la mesure de la terre* (2 livres) est malheureusement perdu. Nous n'avons connaissance de ses travaux que par des sources indirectes ; on cite généralement Cléomède, Strabon, Héron d'Alexandrie et Géminos de Rhodes pour ce qui est des auteurs grecs; Pline l'Ancien, Macrobe, Martianus Capella, Vitruve ou encore Censorin pour ce qui est des auteurs latins. La plupart de ces sources se contentent de donner la valeur (252 000 stades) trouvée par Eratosthène pour la circonférence terrestre, sans détailler sa méthode. Le texte de Cléomède est certes en contradiction avec toutes les autres sources puisqu'il indique 250 000 stades mais il est le seul à détailler la méthode utilisée. Notons par ailleurs que l'ouvrage de Cléomède peut être considéré comme l'équivalent de nos manuels scolaires¹⁴ modernes et était destiné aux jeunes stoïciens (Bowen 2008).

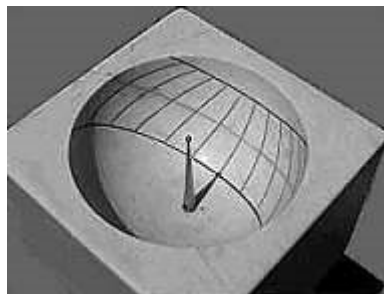


Figure 2 : Photographie d'un cadran solaire hémisphérique ou scaphe

Cléomède après avoir établi dans son ouvrage que la Terre est sphérique et qu'elle est au centre du monde, s'intéresse à sa mesure. Il compare à cet effet deux méthodes, celle de Posidônios et celle d'Ératosthène. Pour exposer la méthode d'Ératosthène, il commence par faire cinq hypothèses¹⁵ :

- Syène (l'actuelle Assouan) et Alexandrie sont situées sur le même méridien,
- la distance entre Syène et Alexandrie est connue (5 000 stades),
- les rayons envoyés par le Soleil arrivent sur Terre parallèles entre eux,
- les droites sécantes des parallèles forment des angles alternes égaux,
- les arcs de cercles 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 3) qui se situe sur le tropique du Cancer, les gnomons des cadrans solaires hémisphériques (ou *scaphè*, voir Figure 2) sont sans ombre, alors qu'au même moment, ceux situés à Alexandrie (A sur la Figure 3) projettent une ombre (DA sur la Figure 3) dont la longueur mesurée correspond à environ 1/50^e du périmètre total de la sphère de la *scaphè*.

¹⁴À la fin de son ouvrage (II, 7, 2), Cléomède écrit: « ces notes de cours (σχολαί) ne contiennent pas les opinions mêmes de l'auteur, mais elles ont été rassemblées à partir d'ouvrages anciens ou plus récents. La plupart de ces développements sont empruntés aux ouvrages de Posidonius »

¹⁵ Le passage dans lequel Cléomède décrit la procédure qu'aurait suivi Eratosthène pour mesurer le périmètre terrestre est présenté en annexe (voir annexe 2)

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). Comme l'arc de cercle AD est égal à $1/50^e$ du cercle total correspondant, l'arc de cercle AS est lui aussi égal à $1/50^e$ de son cercle total, c'est à dire $1/50^e$ de la circonférence terrestre. Enfin, comme AS vaut 5 000 stades (hypothèse 2), il en déduit que la circonférence terrestre vaut $50 \times 5\ 000 = 250\ 000$ stades.

L'hypothèse du parallélisme des rayons du Soleil se présente sous une forme quelque peu différente de la forme actuelle. Cléomède précise en effet que le parallélisme concerne les lignes « reliant différents points du Soleil à différents points de la Terre ». Dans cette perspective, le Soleil n'est pas perçu comme un ensemble de points d'où émane un ensemble de cônes (dont l'angle au sommet est certes quasi-nul) contenant un ensemble de rayons, mais comme un ensemble de points envoyant chacun un rayon unique.

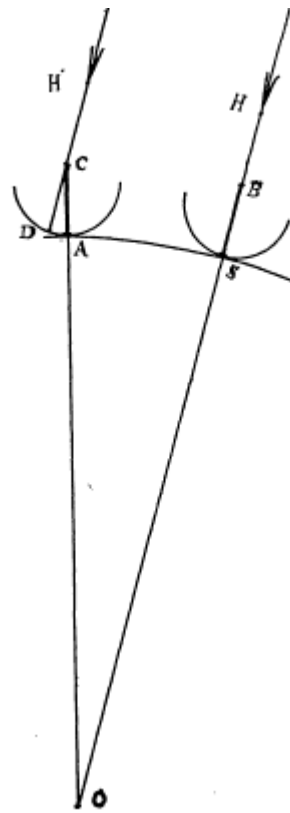


Figure 3 : Schéma représentant la méthode d'Eratosthène telle que décrite par Cléomède. L'arc AD est égal à $1/50^e$ du cercle de centre C et de rayon [AC]. Comme les angles C et O sont égaux, l'arc AS délimite $1/50^e$ du cercle terrestre.

En outre, l'évaluation de la distance entre Syène et Alexandrie demeure encore aujourd'hui sujette à discussions (Bowen 2008). Cléomède donne la valeur de 5 000 stades sans rien préciser à ce sujet. Si l'on poursuit néanmoins le raisonnement précédent, il semble exclu que la distance Syène-Alexandrie ait été évaluée à partir des temps moyens mis par des voyageurs pour aller d'une ville à une autre, a fortiori pour des caravanes de chameaux. Selon Dutka (1993), il s'agit d'un mythe véhiculé par les livres sur 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. Le seul texte nous

indiquant les sources d'Ératosthène pour cette mesure est celui de Martianus Capella qui indique qu'il aurait eu recours à des arpenteurs royaux de Ptolémée. Certains évoquent également la possibilité qu'il s'agît de *bématistes*, hommes entraînés à faire des pas réguliers tout en les comptant pour établir des distances. Ces *bématistes* ont été notamment largement utilisés par Alexandre lors de ses campagnes militaires (Dutka 1993). Ajoutons pour terminer que si l'utilisation de la *scaphe* n'est pas certaine il semble clair qu'en l'absence d'outils mathématiques tels que la tangente¹⁶, il s'agissait là d'un moyen efficace pour convertir un rapport de distance (longueur de l'ombre / hauteur du gnomon) en un arc de cercle (Delambre 1819, Goldstein 1984).

Malgré les incertitudes qui entourent la procédure la mesure du périmètre terrestre et que nous venons de mentionner, le texte de Cléomède se pose, rappelons-le, comme l'un des rares témoignages historiques de la méthode qu'aurait utilisé Eratosthène pour calculer le périmètre de la Terre. Il constitue en cela une source historique dont le contenu se distingue de la plupart des récits vulgarisés que l'on trouve notamment dans les ouvrages scolaires.

Afin d'accéder à la forme scolaire de la procédure de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène », nous avons examiné les activités proposées par l'ensemble des manuels scolaires de physique-chimie de la classe de seconde ainsi que les documents d'accompagnement des programmes de 2001 (voir annexe 1). L'extrait de TP ci-après (Figure 4) est un exemple prototypique de ce qui est généralement proposé dans les manuels. Les activités s'organisent à peu près toutes de la même façon : énoncé des faits observés, de quelques données chiffrées (angle pertinent, distance entre Alexandrie et Syène), des hypothèses nécessaires (parallélisme des rayons, lois des angles alternes égaux, sphéricité de la Terre), schéma donnant à voir la façon dont la mesure a pu être réalisée. Lorsque le récit de la procédure fait l'objet de questions, ces dernières portent pour la plupart sur le calcul du périmètre terrestre que l'on demande aux élèves d'effectuer à partir de la valeur de l'angle entre la droite passant par un bâton planté à Alexandrie et la droite verticale passant par le sommet du bâton.

Sur la forme, on remarque que les références historiques (les sources) ne sont jamais mentionnées. Il n'est, par exemple, jamais précisé aux élèves si les schémas proposés sont historiques ou non, s'ils ont été faits de la main d'Eratosthène... On ne sait pas non plus comment (et sous quelle forme) nous est parvenu le récit de la mesure. En outre, les récits des manuels ne disent pas tous la même chose : dans certains cas, l'observation à Syène s'est faite à l'aide d'un puits (*Bordas, Bréal, Hachette*), d'en d'autres cas, à l'aide d'un bâton, d'un gnomon (*Hâtier, Nathan*), d'en d'autres cas encore, grâce à un obélisque (*Hachette*). La mesure de la distance entre Syène et Alexandrie correspondrait tantôt à un nombre de pas de bématistes, tantôt à un nombre de jours de voyage de caravanes de chameaux.

¹⁶ La « tangente » a été inventée au II^e siècle avant J.C. par Hipparque, un siècle après Eratosthène.

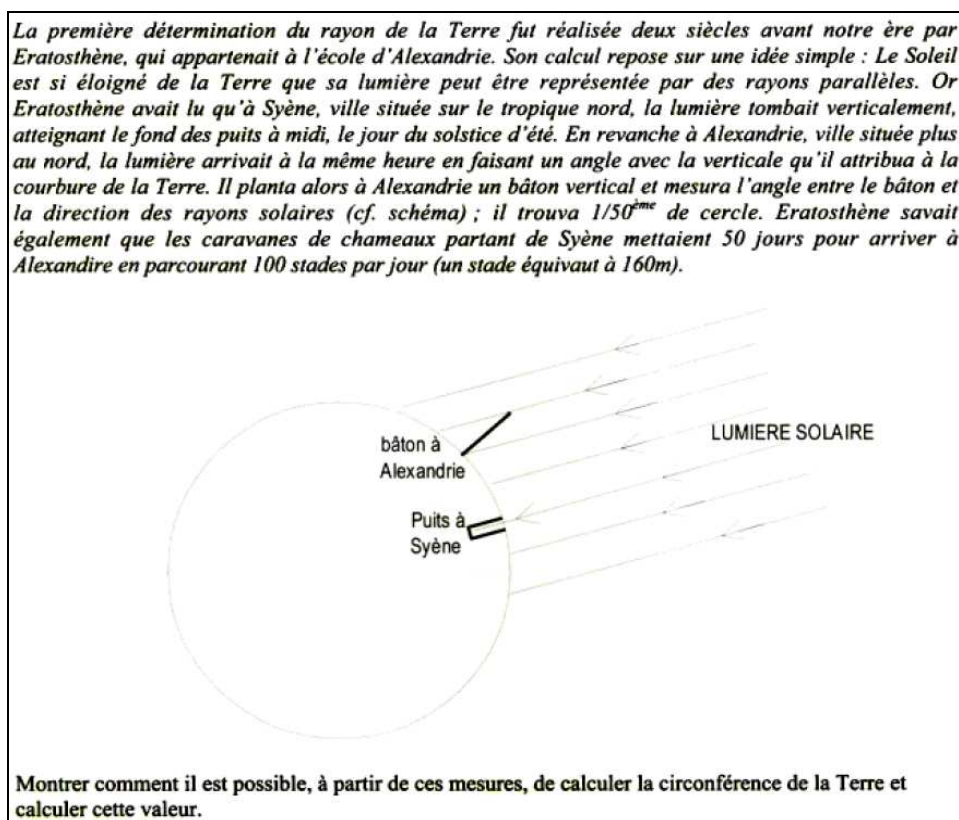


Figure 4 : Activité proposée dans le seconde TP consacré à la mesure d'Eratosthène des Documents d'accompagnement de physique-chimie des programmes de seconde (p. 45).

Sur le fond, la façon dont la mesure de l'angle au sommet du bâton d'Alexandrie a pu être obtenue ne fait l'objet d'aucun questionnement (pas de mention du cadran concave). Sa valeur est généralement donnée, et lorsque ce n'est pas le cas, les élèves sont invités à la calculer en utilisant la notion de tangente (*Hachette*), outil dont il n'est nullement fait mention dans le texte de Cléomède. Concernant l'aspect lié à la nature de la science, là encore l'apport des activités des manuels est assez faible. On signalera toutefois l'effort de mise en perspective des deux « jeux d'hypothèses » (ceux d'Anaxagore et d'Eratosthène) qui structure l'activité proposée par l'édition *Nathan* et qui permet aux élèves d'approcher les notions de modèle et d'hypothèse¹⁷. Quoiqu'il en soit, le rapprochement de ces différents éléments avec ceux du récit de Cléomède nous incite à conclure que la forme prise par la mesure d'Eratosthène dans les manuels scolaires et les documents d'accompagnement ne présente pas un grand intérêt historique. Qu'en est-il de l'intérêt didactique ?

Des élèves à qui l'on demande d'expliquer à l'aide de schémas la raison pour laquelle aucune ombre n'est visible au pied des obélisques à Syène à midi au solstice d'été alors qu'au même moment des ombres sont visibles aux pieds des obélisques à Alexandrie (ville située plus au nord, sur le même méridien) représentent la propagation de la lumière du Soleil en utilisant des rayons divergents (Merle 1994, Farges & al. 2002, Ducourant 2007 ; voir Figure 5). Cette

¹⁷ Au 5^e siècle avant J.C., il semble qu'Anaxagore de Clazomène (500-428) se soit appuyé sur la mesure de la taille des ombres au pied de gnomons situés à Alexandrie et à Syène au solstice d'été pour calculer une valeur de la distance entre la Terre et le Soleil (Terre qu'il considère plate). Il aurait utilisé pour cela une géométrisation de la propagation de la lumière du Soleil en rayons divergents issus d'un point.

modélisation « spontanée » de la propagation de la lumière du Soleil s'avère tout-à-fait performante (elle permet d'expliquer pourquoi il n'y a pas d'ombre à un endroit et une ombre à un autre endroit de la terre) et pourrait même, dans une certaine mesure, être considérée comme correcte [article 2]. Représenter la propagation de la lumière du Soleil en des rayons parallèles n'est pas naturel¹⁸. Les élèves optent spontanément pour un modèle en rayons divergents et font figurer le Soleil sur la plupart de leurs dessins¹⁹. Le passage de la divergence au parallélisme nécessite un passage à la limite complexe, un saut conceptuel dont la difficulté ne doit pas être sous-estimée.

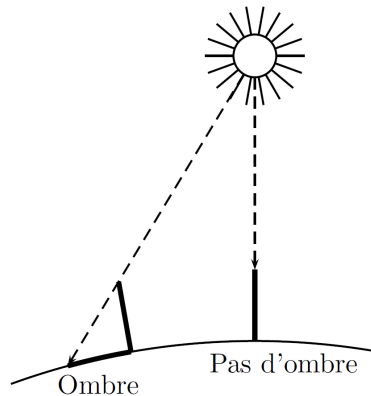


Figure 5 : Dessin prototypique d'élèves à qui l'on demande d'expliquer pourquoi au solstice d'été deux gnomons ne projettent pas la même ombre en deux endroits différents de la Terre situés le long du même méridien (Merle 1994, Farges & al. 2002, Ducourant 2007).

Pourtant, la plupart des manuels scolaires de seconde se contentent d'énoncer l'hypothèse du parallélisme sans que celle-ci ne soit réellement construite voire interrogée. Seule l'activité proposée par l'édition *Nathan* pose le parallélisme d'Eratosthène comme alternative à l'hypothèse des rayons divergents d'Anaxagore mais n'en fait pas l'objet d'une construction spécifique. En revanche, dans les *documents d'accompagnement*, un exercice complet est consacré à cette question mais n'est malheureusement directement associée aux fiches TP (*Documents d'accompagnement*, p. 71)²⁰.

¹⁸ Cette modélisation est d'ailleurs discutable dans la mesure où le Soleil est une source étendue : chaque point du Soleil émet de la lumière dans toutes les directions. Mais l'éloignement du Soleil est tel que cette divergence tend vers un parallélisme. Cependant, le Soleil n'est pas un point mais une somme de points et pour tous ces points, il se produit un phénomène identique. Par conséquent, les gnomons de Syène et d'Alexandrie sont atteints par des cônes divergents issus de tous les points du Soleil, ce qui donne naissance à des zones de pénombre au pied des gnomons (y compris au pied du gnomon de Syène). Nous renvoyons ici à [article 2].

¹⁹ On peut supposer que la contrainte liée à la taille de la feuille et l'impossibilité de représenter sur un même schéma la ligne entre Syène et Alexandrie et la ligne reliant le Soleil à la Terre amène les élèves à adopter une représentation en rayons divergents. Selon Feigenberg et al. cette représentation ne serait pas due à un manque de connaissance, mais à une difficulté spécifique aux échelles en jeu dans la représentation des observations décrites (Feigenberg et al. 2002).

²⁰ Il existe, dans la littérature pédagogique, certaines activités consacrées à la découverte d'Eratosthène qui ont pris le parallélisme des rayons du Soleil comme un objectif d'apprentissage *per se*. Ces activités suggèrent de construire cette hypothèse sur la base d'observations locales d'ombres formées au pied de petits bâtons proches l'un de l'autre (Farges & al. 2002, Ducourant 2007). L'inconvénient de ce type d'activité c'est qu'il

L'activité visant à faire reproduire aux élèves de seconde la mesure de la circonférence de Terre par la méthode dite d'Eratosthène présente deux inconvénients majeurs. Le premier, c'est que telle qu'elle apparaît dans les manuels scolaires (et dans les documents d'accompagnement) cette activité présente de nombreux anachronismes (on peut donc questionner son caractère « historique »), tout en respectant l'ordre de la description dont Cléomède se fait témoin. Le second, c'est qu'elle laisse de côté une difficulté de taille, celle de la représentation de la propagation de la lumière pour une source très éloignée. Ce constat anéantit-il pour autant tout projet d'insertion de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Eratosthène » au sein de la sphère scolaire ? Si tel n'est pas le cas, quelles sont les conditions d'une telle insertion ? Dans la section suivante nous apporterons quelques éléments de réponses engageant l'élaboration d'un cadre spécifique d'utilisation du matériau historique pour la classe de sciences et permettant la construction de reconstructions didactiques. Avant d'en venir à la présentation de ce cadre, nous souhaitons présenter l'analyse d'un deuxième exemple d'utilisation rituelle d'éléments historiques : la présentation des expériences de Torricelli et de Pascal dans le contexte de l'apprentissage du concept de pression.

2.2. Etude critique de l'utilisation scolaire des expériences barométriques de Torricelli et de Pascal

Si l'étude de l'air atmosphérique apparaît comme une thématique privilégiée des programmes de sciences de l'école primaire, l'étude de la pression atmosphérique se voit, elle, plutôt délaissée et ce, quel que soit le niveau scolaire considéré. De manière plus spécifique, à un niveau élémentaire d'enseignement, l'objectif des programmes français est de faire prendre conscience aux plus jeunes que l'air gazeux présent dans l'atmosphère est une matière à part entière dotée de propriétés dont certaines sont comparables à celles des liquides et des solides : comme eux, l'air résiste à la compression, il peut être transvasé d'un contenant à l'autre, il est susceptible de transporter certains objets, il occupe un certain volume et il possède une masse non nulle (Saltiel & Hartmann, 2005). Cette description macroscopique de l'air atmosphérique est complétée par une approche microscopique au collège où l'étude de la pression apparaît dans la partie « de l'air qui nous entoure à la molécule » (BOEN spécial n°6 du 28 août 2008, p. 17). La « pression » y est présentée comme une grandeur macroscopique « qui se mesure avec un manomètre », et se voit associée à l'enseignement de la compressibilité des gaz. Le thème de convergence n°4 dédié à l'étude des phénomènes météorologiques semble l'occasion d'aborder le concept de pression atmosphérique mais là encore, il sera dit aux élèves qu'il s'agit d'une « grandeur mesurable », les questions relatives à sa nature n'étant pas abordées. Depuis la rentrée 2010, les programmes de physique de la classe de seconde s'organisent autour de trois thématiques : la santé, le sport et l'univers. L'étude du concept de pression est proposée dans la partie thématique « sport » (BOEN spécial n°4 du 29 avril 2010, p. 8, voir Figure 6).

oblige les élèves à admettre que ce qui se produit localement (à l'échelle d'une feuille de papier par exemple) se produit de manière identique à l'échelle d'une portion du cercle terrestre.

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
La pression : la pression est une grandeur physique qui permet de comprendre l'influence de l'altitude sur les performances sportives et les effets physiologiques ressentis en plongée subaquatique.	
Pression d'un gaz, pression dans un liquide. Force pressante exercée sur une surface, perpendiculairement à cette surface.	Savoir que dans les liquides et dans les gaz la matière est constituée de molécules en mouvement. Utiliser la relation $P = F/S$, F étant la force pressante exercée sur une surface S , perpendiculairement à cette surface.
Pression dans un liquide au repos, influence de la profondeur.	Savoir que la différence de pression entre deux points d'un liquide dépend de la différence de profondeur. Savoir que la quantité maximale de gaz dissous dans un volume donné de liquide augmente avec la pression.
Dissolution d'un gaz dans un liquide. Loi de Boyle-Mariotte, un modèle de comportement de gaz, ses limites.	Savoir que, à pression et température données, un nombre donné de molécules occupe un volume indépendant de la nature du gaz. <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour établir un modèle à partir d'une série de mesures.</i>

Figure 6 : Extrait des programmes de physique chimie de la classe de seconde, BOEN spécial n°4 du 29 avril 2010, p. 8 (thématique : le sport)

Il s'agit d'aborder les propriétés macroscopiques (en termes de pression, volume et température) et microscopiques (associées au comportement moyen d'une population de molécules) d'un gaz contenu dans une enceinte close. Cette partie du programme n'inclut pas explicitement l'étude de la pression atmosphérique²¹. En outre, on attend des élèves qu'ils sachent que la différence de pression entre deux points d'un liquide est associée à la différence de hauteur entre ces deux points. Cette même connaissance pourrait être attendue dans le cas de l'air, ce qui n'est pas le cas, la pression dans un gaz étant approchée, comme nous le disions, par l'étude des propriétés du mouvement des particules constituant ce gaz. Cette spécificité des programmes laisse entendre que la relation macroscopique $\Delta p = \rho g \Delta h$ est propre aux liquides et que la modélisation microscopique concerne elle uniquement les gaz²². Au regard de ces choix, l'exploitation de l'expérience de Torricelli comme « preuve » de l'existence de la pression atmosphérique ou comme exemple d'instrument (historique) de mesure de cette pression apparaît peu appropriée tant les outils conceptuels fournis aux élèves semblent insuffisants. Pourtant, et alors que la pression atmosphérique n'est pas étudiée en tant que telle dans les programmes de sciences physiques du secondaire, l'expérience barométrique de Torricelli apparaît dans plusieurs manuels scolaires (Bordas 2004, p. 251 et 258, Hachette Collection Durandeau 2004, p. 165). Dans l'exemple de la Figure 7, on présente à des élèves de seconde un baromètre à mercure : la mesure de la pression atmosphérique est associée à la hauteur de mercure dans le tube. Si le principe de la mesure correspond bien à celui découvert au 17^e siècle, notamment par Torricelli, le baromètre présenté n'a, quant à lui, que peu à voir avec le dispositif utilisé par Torricelli (dans l'[Article 3] nous proposons une reconstruction historique du concept de pression atmosphérique ; le dispositif torricellien y apparaît tel

²¹ Sur ce point, les programmes de 2010 n'ont pas subi de modifications majeures. Dans les programmes précédents (BOEN hors-série n°2 du 30 août 2001, p. 25), la partie consacrée à la pression pourtant intitulée « l'air qui nous entoure » présentait des objectifs identiques et ne laissait pas une plus grande place au concept de pression atmosphérique *per se* (contrairement d'ailleurs à ce que le titre pouvait laisser penser...).

²² Cela dit, le comportement microscopique des liquides est loin d'être abordable au niveau du secondaire.

qu'il fut dessiné par Torricelli dans une lettre qu'il adressa en 1644 à Ricci). A ce titre, la portée culturelle historique d'une vignette de ce type apparaît discutable.

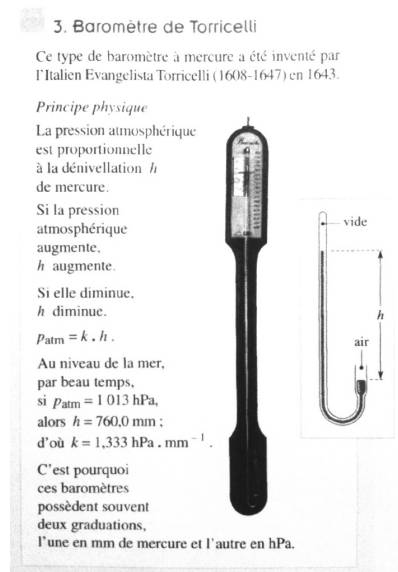


Figure 7 : « Le baromètre de Torricelli », extrait du manuel de seconde Hachette Collection Durandeau 2004, p. 165.

Outre cet écart avec l'histoire elle-même, ce qui nous semble également problématique c'est que cette expérience est présentée comme allant de soi. Autrement dit, le lien entre la pression atmosphérique et la hauteur de la colonne de mercure dans le tube semble triviale, et dans certains cas, la même expérience est présentée comme *preuve* de l'existence de la pression atmosphérique. Pourtant, l'hypothèse du « poids de l'atmosphère » (forme primitive du concept de pression atmosphérique) formulée (entre autres) par Torricelli puis par Pascal pour expliquer l'expérience barométrique n'emporte pas l'adhésion immédiate d'une communauté savante encore dominée par l'autorité de l'*horror vacui* (l'horreur du vide) prônée par Aristote depuis le 4^e siècle avant J.-C (voir **[Article 3]**). Cette difficulté historique a sonné comme une alerte et nous a conduit à interroger la façon dont les étudiants d'aujourd'hui comprennent l'expérience barométrique de Torricelli.

Afin de répondre à cette question, nous avons élaboré un questionnaire papier-crayon structuré autour du récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs (voir Figure 8). Dans la première question les étudiants sont invités à expliquer l'expérience de Torricelli. Cette demande d'explication est complétée, dans une deuxième question, par une question relative à la nature de l'espace libéré au-dessus du mercure du tube (espace torricellien). On demande enfin aux étudiants d'interpréter le résultat de l'expérience réalisée au sommet du Puy de Dôme (troisième question). Nous avons proposé notre questionnaire à 128 étudiants répartis sur trois universités françaises différentes, tous inscrits en troisième année de licence pluridisciplinaire scientifique au cours des années universitaires 2006-2007 et 2007-2008. Les réponses au questionnaire ont été analysées de manière quasi-inductive selon une

méthodologie proche de la *grounded theory* (Strauss & Corbin, 1994)²³. L'analyse détaillée des réponses est présentée dans [article 4].

Questionnaire

Blaise Pascal, physicien, mathématicien et philosophe du XVII^e siècle s'est beaucoup intéressé aux phénomènes liés aux fluides, qu'il nomme « liqueurs ». En 1648, pour vérifier une de ses théories, il demande à son beau-frère Florin Périer, qui réside en Auvergne, de réaliser l'expérience suivante à deux endroits différents : on remplit un tube (fermé à une extrémité) de mercure et on le place retourné et vertical sur une cuve qui est elle-même remplie de mercure. La manipulation est réalisée dans la ville de Clermont Ferrand (moins de 400m d'altitude, expérience 1 ci-dessous) et au sommet du Puy de Dôme (à plus de 1400m d'altitude, expérience 2 ci-dessous).

Expérience 1 Expérience 2

- Q1 : Expliquez le résultat de la première expérience
- Q2 : Qu'y a-t-il selon vous dans l'espace en haut du tube, au-dessus du mercure ?
- Q3 : Comment expliquez-vous la différence de hauteur h et H entre les deux expériences ?

Figure 8 : Questionnaire utilisé pour caractériser les raisonnements mis en œuvre par des étudiants de premier cycle universitaire pour expliquer l'expérience barométrique de Torricelli et son utilisation par Blaise Pascal au Puy-de-Dôme.

Nous retenons de cette étude que seul un quart des étudiants que nous avons interrogés fournit une réponse associant l'action de l'air extérieur et la suspension (ou la variation) du mercure dans le tube aux trois questions posées. L'ensemble de ces étudiants affirme en outre que l'espace laissé libre en haut du tube ne contient aucune matière (25 sur 128). Mais la réciproque n'est pas vraie. Ainsi, tous les étudiants qui répondent « du vide » ou « rien » à la question Q2 (62 sur 128) n'expliquent pas la suspension du mercure dans le tube par l'action de l'air extérieur. Pour 37 d'entre eux, la raison de cette suspension est à rechercher soit dans l'action du mercure de la cuve, soit dans l'action d'un paramètre tel que la pression ou la température.

²³ Les catégories utilisées pour l'analyse des réponses des étudiants sont construites à partir des catégories pensées *a priori* par le chercheur et incluent des catégories dites « émergentes ». Ces dernières, issues directement des données, sont identifiées par inférence à partir des régularités observées dans les explications produites par les étudiants interrogés.

De fait, une partie non-négligeable des réponses aux questions Q1 et Q3 (45 des 128 réponses à Q1 et 30 des 128 réponses à Q3) témoigne de raisonnements locaux qui, pour certains, s'appuient sur l'établissement de liens entre deux sous-parties intrinsèques au dispositif (voir Figure 9), alors même que celui-ci nécessiterait plutôt une approche systémique globale, ou pour le moins, une approche associant un élément extérieur au dispositif (l'air) et le dispositif lui-même.

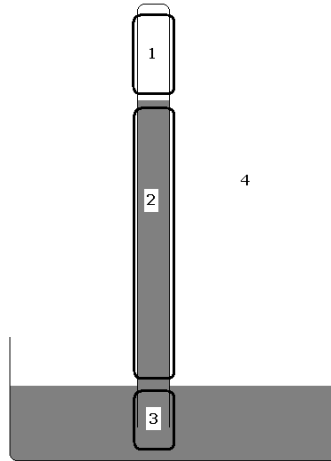


Figure 9 : Sous-parties du dispositif torricellien utilisées par certains étudiants dans leurs explications de l'expérience barométrique, après enseignement de statique des fluides. Sous-partie n°1 : espace torricellien (Torr), sous-partie n°2 : mercure du tube (Hg tube), sous-partie n°3 : mercure de la cuve (Hg cuve), sous-partie n°4 : Atmosphère (Air).

On a ainsi pu distinguer trois grands types d'explications :

- Des explications localisées uniquement sur le mercure du tube. Dans ce cas, les raisonnements mis en œuvre font intervenir les conditions extérieures (température, pression) responsables de la diminution du volume initial de mercure. La variation de la colonne dans le tube au cours de l'ascension n'est pas consécutive à la chute d'une partie de celui-ci dans la cuve, mais à une contraction due au changement de pression ou de température.
- Des explications s'appuyant sur une action entre le mercure de la cuve et celui du tube. Dans ce cas, l'interface entre les deux mercures constitue une limite physique en soi : le mercure de la cuve joue le rôle de support et retient le mercure du tube. Cette explication a du mal à résister au résultat de l'expérience après ascension : les deux tiers des étudiants y ayant recours à Q1 y renoncent à Q3.
- Des explications reposant sur l'établissement d'un lien entre l'action d'une matière contenue dans l'espace torricellien et le mercure du tube. Dans ce dernier cas, la matière contenue dans l'espace torricellien pousse le mercure du tube. Cette action est plus forte en altitude car la pression augmente avec l'altitude. Ces explications sont cohérentes, une fois l'hypothèse de l'augmentation de la pression posée, et ne trouvent pas de contradiction dans le résultat de l'expérience.

Enfin, si l'on reprend l'ensemble des réponses aux questions Q1 et Q3, il apparaît qu'un nombre significatif d'étudiants persévère dans la tenue de leur raisonnement d'un bout à

l'autre du questionnaire. Le Tableau 1 ci-dessous rend compte de cette persévérance : il présente la répartition des étudiants qui proposent un certain type de réponse à Q1 (lien Hg(tube)/Torr, par exemple) et le maintiennent à Q3. A la lecture de ce tableau, nous constatons qu'à l'exception du lien Hg(cuve)/Hg(tube), tous les autres types de réponses se révèlent, pour les étudiants qui en sont les auteurs, opérationnels, ce qui explique sans doute leur permanence.

Liens sur lesquels les étudiants fondent leur raisonnement	Réponses à Q1	Réponses à Q1 ET Q3	
Lien Air/Hg(tube)	25	21	<i>Réponse à Q2 correcte</i>
Lien Hg(cuve)/Hg(tube)	15	4	
Lien Hg(tube)/Espace Torr	13	12	
Mercure du tube	17	14	<i>Réponse à Q2 incorrecte</i>
Pression	28	28	

Tableau 1 : Répartition des étudiants qui proposent un certain type de réponse à Q1 et le maintiennent à Q3.

La présentation de l'expérience barométrique qui structure la question Q1 ne fait pas explicitement intervenir le milieu extérieur. Cette question laisse de nombreux étudiants sans réponse et pour beaucoup la difficulté réside dans l'existence de l'espace torricellien et dans l'explication de la chute partielle du mercure dans le tube. Force est donc de constater que cette expérience ne démontre pas l'existence du vide (près de la moitié des effectifs de notre étude affirme que cet espace contient quelque chose), pas plus qu'elle ne prouve l'existence de la pression atmosphérique. La situation présentée à la question Q3 permet à un nombre plus important d'étudiants de mobiliser la notion de « pression » (même si les réponses apparaissent majoritairement peu explicites en termes de lien entre la pression de l'air et la variation de la colonne de mercure). Ceci peut s'expliquer par la nature de l'enseignement dispensé dans le supérieur : la loi fondamentale de l'hydrostatique telle qu'elle apparaît dans la plupart des ouvrages de physique du supérieur associe la variation de l'altitude et celle de la pression. Par ailleurs, la diminution de la hauteur du mercure dans le tube est explicitement liée dans Q3 à l'augmentation de l'altitude. Les étudiants interrogés semblent mobiliser des explications liées à la loi de l'hydrostatique autour de l'expérience du Puy de Dôme (sans que celles-ci soient pour autant toutes conformes au modèle scientifique).

L'attention portée à la façon dont des étudiants de premier cycle universitaire ayant reçu un enseignement de statique des fluides comprennent l'expérience de Torricelli et son utilisation par Blaise Pascal au Puy de Dôme indique que l'exploitation en classe du récit de cette expérience nécessite un accompagnement didactique minutieux. Outre le fait que cette expérience paraît ne pas permettre à elle seule d'approcher la cause de la suspension du mercure dans le tube de verre, elle suggère également que la pression atmosphérique est une grandeur directement associée à l'action de la colonne d'air sur la surface du mercure de la bassine (voir par exemple sous-partie 4, Figure 9). En effet, au 17^e siècle, la pression est conçue comme une propriété macroscopique de l'air (ou de n'importe quel fluide immergeant) dont la valeur en un point du fluide est associée à la « pesanteur de la masse »

de la colonne du fluide en ce point. Cette idée est complétée par Pascal qui démontre dans son *Traité sur l'équilibre des liqueurs* qu'en ce même point, la pression s'exerce dans toutes les directions. Il existe donc au sein des fluides (air, eau...) une grandeur physique dont l'action s'exerce en un point de manière identique dans toutes les directions de l'espace et qui est liée au « poids » de la quantité de matière surmontant ce point.

Ces deux aspects apparaissent difficilement conciliables pour des élèves de secondaire : l'action de la colonne d'air est pensée comme une action verticale et vers le bas et paraît, de ce fait, contredire l'idée d'une action dans toutes les directions. Aborder le concept de pression par la voie microscopique doit permettre de lever cette difficulté. C'est en tout cas ce que révèlent les résultats d'une étude exploratoire conduite par Caillarec (Caillarec, 2007). Dans cette étude, Caillarec s'est attachée à présenter à des étudiants de 3^e année de licence (ayant participé à l'enquête présentée précédemment) un logiciel de simulation du mouvement des molécules constituant un gaz parfait²⁴. L'objectif était que les étudiants parviennent à associer la grandeur « pression » aux propriétés du comportement moyen des molécules d'un gaz (parfait) contenu dans une enceinte fermée (fréquence et violence des chocs entre les molécules, entre les molécules et les parois d'une enceinte, égalité statistique de la fréquence des chocs quelle que soit l'orientation de la paroi). Après prise en main et exploitation du logiciel les étudiants ont été globalement capables de proposer une explication correcte aux situations du questionnaire Figure 8. Ce premier résultat, à valeur heuristique, nous laisse penser que la compréhension de la notion de pression (et en particulier celle de pression atmosphérique) profite largement de l'approche microscopique. Cette approche permet notamment de concilier l'idée d'une action globale verticale et vers le bas avec l'idée d'une action localement isotrope.

Si l'on se réfère aux éléments ayant contribué à l'émergence du concept de pression atmosphérique, il apparaît que la création par Torricelli puis par Blaise Pascal de l'idée de « fluide » comme cadre unificateur de l'air et de l'eau en tant que milieu d'immersion constitue un levier fondateur de cette émergence [article 3]. En regard de cette avancée historique, la portée didactique d'un tel rapprochement semble peu efficace. En effet, si les étudiants que nous avons interrogés savent que l'air possède une masse non-nulle, ils n'expliquent pas pour autant le résultat de l'expérience barométrique comme consécutive à l'immersion du dispositif dans un « océan » d'air pesant. L'idée d'immersion devient-elle plus évidente lorsque l'air est approché de façon microscopique. Finalement, le choix des programmes scolaires d'introduire en début de lycée le concept de « pression » (pour un gaz) sous un angle à la fois macro et microscopique n'est pas dénué d'intérêt. On peut toutefois regretter que l'air atmosphérique ne soit pas explicitement traité de cette manière : la compréhension de l'expérience de Torricelli en bénéficierait très certainement. Bien entendu, un tel choix impliquerait une distorsion forte avec la genèse historique du concept de pression atmosphérique. Mais celui-ci apparaîtrait justifié par les contraintes qui structurent ici la sphère scolaire et qui incluent, entre autres, la prise en compte des difficultés des élèves associées à l'apprentissage d'un savoir donné. Cette idée constitue l'un des pivots du cadre que nous présentons maintenant, cadre qui vise à jalonner la conception

²⁴ Le logiciel de simulation utilisé ainsi que le matériel d'exploitation pédagogique sont disponibles à l'adresse : <http://www.epi.asso.fr/logiciel/catal/7219.htm> (vérifié le 15 juillet 2011).

de séquences d'enseignement se donnant pour but l'apprentissage d'un savoir scientifique par la voie historique.

3. Apprendre la physique à partir de son histoire : définition d'un cadre

Les questions soulevées par les tentatives précédentes mises en perspective de notre travail de thèse nous ont conduite à réfléchir à la création d'un cadre se posant comme un moyen de faire de l'histoire des sciences un vecteur d'apprentissage tout en donnant l'opportunité aux élèves de s'immerger dans un contexte historique. La création de ce cadre procède d'une volonté d'offrir aux enseignants (et en particulier aux enseignants de sciences physiques) un moyen d'intégrer à leurs pratiques des éléments d'histoire des sciences de façon à permettre aux élèves d'apprendre (autrement) la physique. Avant d'en venir à la définition même de ce cadre, il nous semble nécessaire d'étudier quelques voies explorées par les chercheurs en didactique pour concevoir des séquences d'enseignement à partir du matériau historique²⁵.

3.1. Eléments d'analyse de séquences d'enseignement fondées sur l'histoire des sciences dans la recherche en didactique

Si les plaidoyers en faveur de l'histoire des sciences sont abondants, les exemples de séquences d'enseignement évaluées dans le cadre de la recherche en didactique des sciences apparaissent encore peu nombreux. Nous avons cherché à en caractériser certaines (quinze au total) afin de dégager les modes d'intervention du matériau historique et de repérer d'éventuels invariants dans ces modes d'intervention²⁶. Notre objectif était de voir dans quelle mesure les modes d'intervention de l'histoire des sciences se voient contraints par les buts affichés par ces séquences. Nous pensons en effet que l'insertion historique prend des formes différentes selon qu'elle contribue à apporter des éléments d'ordre culturel, épistémologique (liés à la nature de la science) et/ou conceptuel. Dans les quinze séquences que nous avons analysées, les élèves n'ont pas systématiquement accès à un matériau historique (écrits originaux) mais la dimension historique s'incarne de manière explicite, par exemple sous la forme d'un récit historique réécrit par le chercheur ou sous la forme d'une réplique d'expérience historique²⁷. Si les choix qui motivent l'extraction hors de la sphère historique sont majoritairement explicites, les choix d'insertion associés à l'utilisation ces éléments au sein de la sphère scolaire sont globalement implicites. Par

²⁵ Une présentation plus complète des interactions entre recherche en didactique et histoire des sciences est disponible en introduction du numéro 3 de la revue *Recherches en Didactique des Sciences et de la Technologie* dont le dossier thématique que nous avons coordonné avec P. Schneeberger est directement consacré à ces questions (de Hosson & Schneeberger, 2011).

²⁶ Crépin P. (2005), Galili, I. & Hazan, A. (2000), Guedj M. (2005), Irwin A. (2000), Kipnis N. (2001). Kubli F. (2001), Laugier A. & Dumon A. (2000), Lochhead J. & Dufrence R. (1989), Maurines L. & Mayrargues A. (2007), Maurines L., Beaufils D. & Chapuis (2009), Merle H. (2002), Monk M. & Osborne J. (1997). Rudge D. & Howe M. (2004). La grille utilisée pour cette exploration est présentée en annexe 3.

²⁷ Nous avons conscience que la faiblesse de notre échantillon ne nous permet pas de tirer des conclusions définitives mais d'ébaucher le cadre d'une exploration qui pourrait être poursuivie.

ailleurs, il semble que nous soyons en présence de deux tendances assez marquées : lorsque l'histoire de sciences est utilisée à des fins culturelles ou dans le but d'approcher la nature de la sciences, les élèves ont accès à des sources historiques de première main souvent présentées de manière chronologique, à des extraits d'ouvrages d'historiens mis en forme ou à des récits d'expériences, (Laugier & Dumon 2000, Irwin 2000, Kipnis 2001, Kubli 2001, Rudge & Howe 2004, Maurines *et al.* 2007, 2009) ; lorsque l'histoire des sciences vise l'apprentissage d'un concept ou d'une loi, l'insertion historique se présente sous la forme de l'exposé d'un problème à résoudre (pas nécessairement incarné dans un texte historique). La recherche de la solution est partie prenante du processus de construction du savoir par les élèves (Lochhead & Dufrence 1989, Monk & Osborne 1997, Galili & Hazan 2000, Merle 2002, Guedj 2005). Cette deuxième orientation semble aujourd'hui délaissée au profit de la première²⁸. C'est pourtant vers celle-ci que se sont tournés nos propres travaux depuis ces sept dernières années. C'est également à cette orientation (l'histoire des sciences visant l'apprentissage d'un concept ou d'une loi) que s'adresse le modèle pédagogique créé par les chercheurs anglais Monk et Osborne.

Monk et Osborne proposent un « modèle pédagogique » en vue de structurer une séquence d'enseignement à partir d'un matériau historique (Monk & Osborne 1997). Même si les séquences que nous avons analysées ne se réclament pas de ce modèle, nous avons néanmoins trouvé que les choix effectués par les chercheurs pouvaient être rapprochés de ceux sur lesquels Monk & Osborne fondent leur modèle (un schéma du modèle d'implémentation de Monk et Osborne est reproduit Figure 10).

Ce modèle comporte six étapes ; la première consiste à présenter aux élèves un problème à résoudre. Ce problème est inspiré d'une question qui a fait débat dans le contexte historique. Dans la seconde étape, les élèves proposent diverses explications ou solutions en vue de résoudre le problème posé. La troisième étape est celle de l'introduction de l'histoire des sciences ; les théories ayant eu cours dans l'histoire en relation avec le phénomène ayant servi de source d'inspiration pour la question posée sont présentées aux élèves. Cette présentation peut prendre plusieurs formes : extraits de textes historiques, récits historiques, documents iconographiques, etc. Elle a pour but d'inciter les élèves à exprimer des points de vue divergents. Ceux-ci doivent ensuite imaginer une expérimentation permettant de déterminer le point de vue le plus valide. L'avant-dernière étape consiste en l'étude approfondie des théories scientifiques actuelles. Cette étape est laissée à l'entière responsabilité de l'enseignement (il s'agit plus ou moins d'un cours magistral). Enfin, la dernière étape permet une discussion sur les apprentissages implicitement réalisés grâce à l'introduction de la composante historique.

Dans ce modèle pédagogique, les théories ayant eu cours dans l'histoire sont directement liées aux idées préalables des élèves. Ces deux aspects constituent des pistes devant être

²⁸ Précisons que la frontière entre ces deux tendances est parfois floue et surtout perméable : à titre d'exemple, approcher l'idée de modèle contribue sans doute à une meilleure compréhension du concept auquel il est associé ; réciproquement, l'implémentation d'une controverse historique au sein d'une classe présente la science sous une forme sans doute moins dogmatique et peut-être aussi plus appropriée. Toutefois, il existe des séquences qui s'inscrivent explicitement (et de manière presque militante) dans le champ exclusivement culturel. C'est le cas notamment des travaux menés récemment par Maurines, Beaufils et Chapuis (Maurines & al. 2009).

explorées en amont par les chercheurs : « Selon notre modèle, les phénomènes présentés aux élèves doivent avoir fait l'objet de théories historiques pouvant faire écho aux idées des élèves » (Monk & Osborne, 1997, p. 414. *Notre traduction*). Le modèle des chercheurs anglais nous apparaît sous-tendu par deux hypothèses (1), (2) implicites :

- (1) Il peut exister des ressemblances entre les idées des élèves et celles des savants. Cette hypothèse est étayée par l'idée que les errances et les polémiques dont l'histoire des sciences est témoin, apparaissent souvent comme des indicateurs plutôt performants des notions qui risquent de poser certaines difficultés d'apprentissage (Saltiel & Viennot, 1985).
- (2) Il existe des expériences permettant de valider certaines idées d'élèves. Cette hypothèse repose sur l'idée d'expérience cruciale, dont le rôle dans la création du savoir scientifique demeure largement débattue (Duhem, 1906).

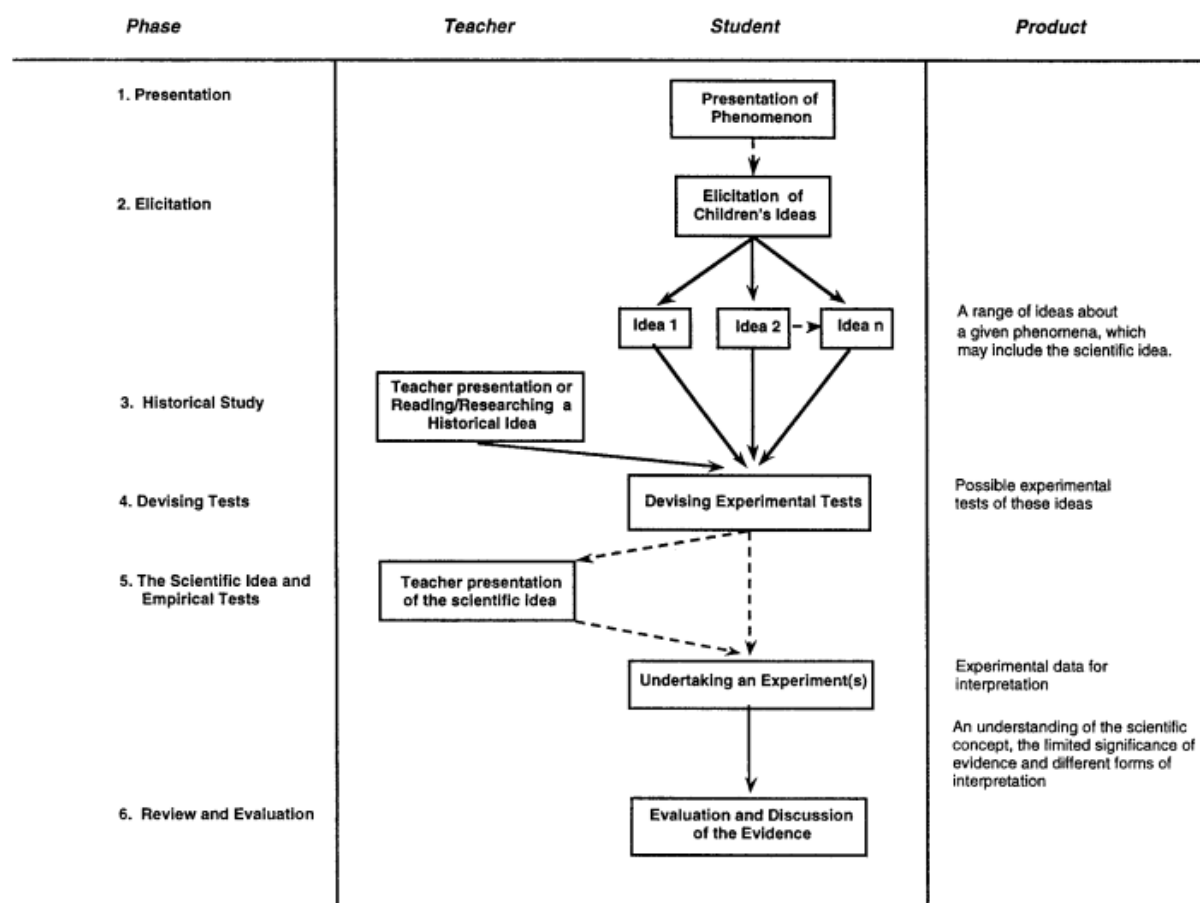


Figure 10 : Modèle pédagogique de Monk et Osborne pour l'élaboration de séquences d'enseignement fondées sur l'histoire des sciences (Monk & Osborne, 1997).

L'un des ressorts pédagogiques récurrents des séquences que nous avons analysées (et qui visent l'apprentissage d'une loi ou d'un concept) est sans aucun doute la création des conditions permettant l'installation d'un débat contradictoire de classe. Il s'agit de choisir une question dont on prévoit qu'elle peut donner lieu à un débat au sein de la classe, et de concevoir un parcours cognitif qui prend appui sur ce débat et qui conduit les élèves vers la

construction d'un savoir scientifique donné. Notre *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* est construit sur ce principe : la question est celle du sens de la vue, sens qui fait débat au sein de la sphère historique (en particulier dans la Grèce antique) et au sein de la sphère scolaire (en particulier chez les jeunes collégiens). Plusieurs chercheurs ont utilisé ce ressort pour concevoir leur séquence d'enseignement. Chez Guedj par exemple, c'est la question du lieu de chute d'une pierre lâchée du haut du mât d'un navire qui est exploitée (Guedj, 2005). Chez Crépin, le concept de fossile est au cœur d'interprétations variées dont on cherche à mesurer le caractère scientifique : un fossile est-il le résultat de la pétrification d'un organisme vivant ou le résultat d'une croissance *in situ* ? (Crépin, 2009).

Cette modalité d'utilisation de l'histoire des sciences nécessite une connaissance préalable du profil conceptuel des élèves, en particulier des idées et des raisonnements risquant de faire obstacle à l'apprentissage envisagé. Elle nécessite également que la question historique fasse sens dans la classe pour favoriser sa dévolution et son appropriation par les élèves, et susciter l'émergence de propositions de résolution. Le choix du problème à extraire de l'écologie historique se voit donc assujéti aux contraintes qui fondent l'écologie didactique (difficultés spécifiques au savoir à enseigner, idées préalables des élèves, temps didactique...). Dans une telle perspective, l'extraction hors de la sphère historique porte essentiellement le problème à résoudre. En revanche, l'histoire des sciences inspire peu (ou pas du tout) les stratégies permettant de résoudre les questions posées aux élèves. Dans les séquences que nous avons examinées, de même que dans le modèle de Monk et Osborne, les modalités de résolution (expérimentales, le plus souvent) paraissent indépendantes des solutions historiques. Il semble pourtant que l'on puisse aller plus loin en poussant l'aide historique jusqu'à la prise en compte d'idées historiquement fécondes, quitte à en proposer, pour la classe, une organisation spécifique.

3.2. Un cadre pour une reconstruction didactique des savoirs

Associer histoire des sciences et enseignement revient pour nous à créer une dialectique de nature épistémologique entre deux enquêtes, l'une, centrée sur les raisonnements des élèves, l'autre tournée vers l'évolution des idées dans l'histoire des sciences. Nous suivons en cela la voie ouverte par Dorier qui s'intéresse à l'épistémologie « en ce qu'elle permet de mieux comprendre les liens entre la constitution d'un savoir dans la sphère savante d'une part et l'enseignement et l'apprentissage de ce savoir d'autre part » (Dorier 2006, p. 16). Cette dialectique permet 1) de préciser les contraintes didactiques auxquelles le savoir est soumis dans le cadre scolaire, 2) d'assujettir l'enquête historique à ces contraintes de façon à extraire les informations historiques à réorganiser, 3) de faire en sorte que ces informations prennent place dans le système didactique pour favoriser l'acquisition du savoir visé, cette dernière étape nécessitant d'assumer le fait que les informations se présentent sous une forme dissemblable à celle prise au sein de la sphère historique. Nous retrouvons là les étapes de « décontextualisation » / « recontextualisation » telles qu'elles apparaissent dans le cadre de la transposition didactique (Chevallard, 1991). Appliqué à l'histoire des sciences, ce processus de transposition va donner naissance à ce que nous appelons une « reconstruction didactique ». Celle-ci est contrôlée par la détermination et l'explicitation de contraintes didactiques spécifiques (attendues de l'enseignement en termes d'apprentissage, difficultés psycho-cognitives sous-jacentes, visibilité du matériau historique, contraintes pédagogiques liées au fonctionnement usuel de la classe).

Nous définissons donc une reconstruction didactique comme une séquence d'enseignement conçue sur la base d'informations historiques explicites et se donnant pour but l'apprentissage d'un concept ou d'une loi physique. La création d'une reconstruction didactique est dépendante d'une enquête psycho-cognitive visant à établir le profil conceptuel d'une population donnée (élèves, étudiants, enseignants...) en caractérisant les types de difficultés et les raisonnements mis en œuvres par cette population confrontée à une situation physique donnée. Cette enquête va servir une enquête historique, visant une reconstruction historique. Il s'agit d'un travail d'exploration et de tri sous-tendu par un projet didactique spécifique : l'élaboration d'un matériau d'enseignement. Par voie de conséquence, une reconstruction historique n'est ni objective et encore moins exhaustive, mais apparaît, comme tout projet de reconstruction, contrainte :

Les reconstructions historiques [sont] toujours incertaines (...). De plus, elles sont toujours partielles. L'historien ne raconte pas tout ce qu'il sait ou pourrait savoir mais ce qui est important (...). L'histoire de l'historien est donc l'effet d'un choix (Koyré 1973, p. 391).

Toutefois, nous nous préservons au mieux des abus d'interprétation qu'une lecture non-experte pourrait engendrer en appuyant nos lectures sur quelques exégèses philosophiques et historiques faisant autorité.

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

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

Dans cette perspective, nous admettrons qu'il existe un « programme » didactique de reconstruction historique. Selon ce programme, l'exploration historique conduite par le didacticien obéit à un « principe de lecture déterminé » d'une part par l'analyse du savoir à enseigner, d'autre part par l'analyse des difficultés des élèves (enquête psycho-cognitive). La reconstruction didactique qui en résulte ambitionne la nécessaire visibilité du matériau historique pour les élèves²⁹, et la prise en compte des difficultés des élèves. La « fécondité » de ce programme peut être ensuite attestée par les effets de cet outil sur l'apprentissage. L'ensemble de ce processus forme l'essence même de notre cadre. Il est schématisé Figure 11.

²⁹ La question de la visibilité de l'histoire des sciences reste ouverte. Nous voyons un intérêt fort à organiser un cours sur la base de considérations historiques permettant par exemple de prendre la mesure de certaines difficultés d'ordre didactique. Dans ce cas, l'histoire des sciences devient une aide pour l'enseignant et peut rester totalement invisible pour les élèves.

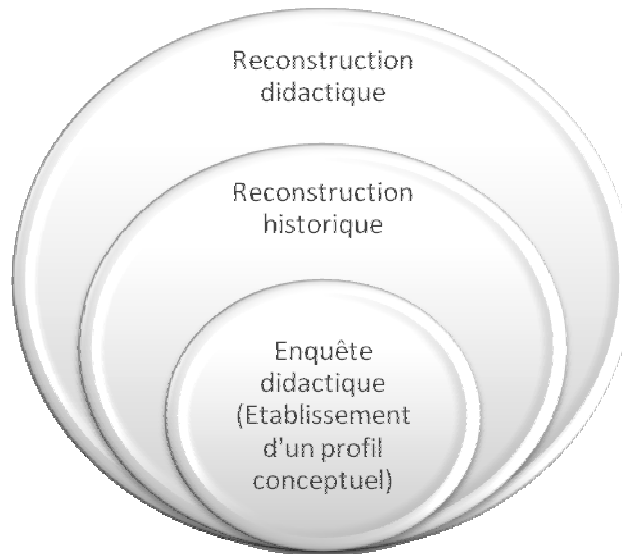


Figure 11 : Schéma présentant la façon dont les projets de reconstruction historique, didactique et d'enquête psycho-cognitive s'organisent. Une reconstruction didactique repose sur une reconstruction historique qui elle-même se voit contrainte par une prise en compte effective du profil conceptuel des élèves (ou des étudiants) établi pour un savoir donné.

Notre cadre organise l'élaboration d'une séquence d'enseignement en tant que résultat d'une transposition didactique et inclut :

- une analyse épistémologique et historique des contenus visés par l'enseignement,
- une analyse des conceptions des élèves, des difficultés et des obstacles qui marquent leur évolution.

En ce sens, il renvoie pour partie aux principes qui président au développement de ce que Duit nomme « Model of Educational Reconstruction » (Duit 2007). Selon ce modèle (Figure 12), la création d'une séquence d'enseignement de sciences repose sur un processus dit « d'élémentarisation » au cours duquel un savoir scientifique donné se voit découpé en unités de savoir élémentaires ; ces unités sont ensuite réorganisées en fonction des contraintes pédagogiques et didactiques propres à l'environnement dans lequel la séquence sera implémentée (conceptions des élèves, style pédagogique de l'enseignement, dimension affective, etc.). A la différence de ce modèle, notre cadre concerne le savoir scientifique pris spécifiquement dans son contexte historique et promeut la prise en compte de contraintes essentiellement didactiques telles que le profil cognitif des élèves. De plus, les reconstructions didactiques vers lesquelles nous tendons s'appuient sur une réorganisation d'idées situées historiquement de manière explicite et incluent, de ce fait, l'utilisation d'un matériau reconnu comme historique et pouvant être identifié comme tel par les élèves. L'ancrage historique de notre réflexion distingue ainsi assez clairement notre projet de reconstruction didactique d'autres projets de reconstruction.

En termes d'évaluation, nous avons choisi de nous situer dans le registre des études de cas et d'associer notre projet de reconstruction didactique à celui d'Ingénierie Didactique (Artigue 1988) pris en tant que paradigme de validation interne de « réalisations didactiques » et fondé sur la confrontation entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori*.

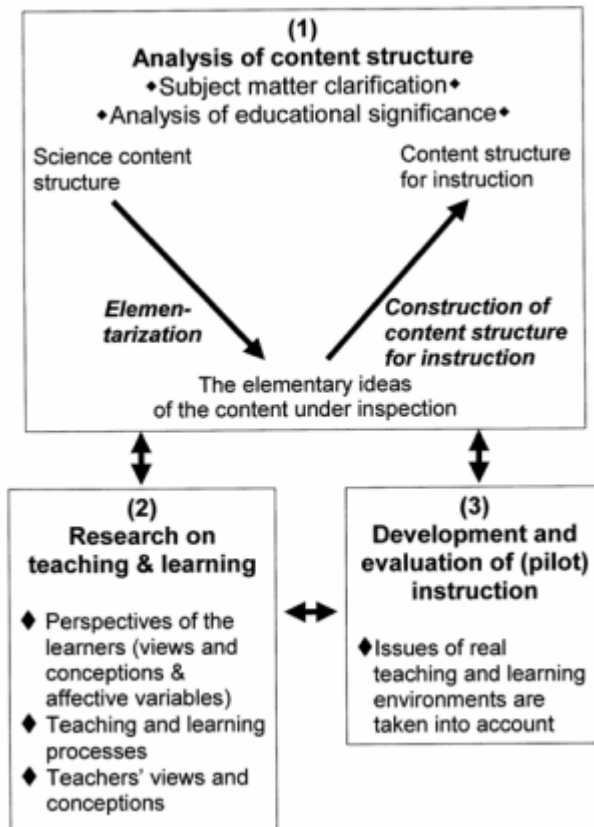


Figure 12 : Schéma représentant l'organisation générale du « Model of Educational Reconstruction » (Duit 2007, p. 6).

Selon cette perspective, nous engagerons quelques hypothèses locales relatives au fonctionnement de la séquence et portant sur les choix didactiques supposés favoriser :

- L'appropriation du problème à résoudre (et sa résolution) par les élèves,
- Le changement conceptuel,

la validation de ces hypothèses dépendant du résultat de la confrontation entre l'analyse *a priori* et l'analyse *a posteriori*. Un tel choix méthodologique devrait nous permettre de dégager un certain nombre de régularités au sein des trajectoires d'apprentissage suivies par les élèves. Nous avons conscience qu'il s'agit là d'une adaptation quelque peu restrictive du paradigme original dans la mesure où l'ingénierie didactique telle que nous l'utilisons voit son champ d'action restreint à l'analyse des processus d'apprentissage d'un concept donné à travers la mise en place de reconstructions contraintes. Considéré hors de son habitat initial (celui de la recherche en didactique des mathématiques), l'ingénierie est utilisée pour provoquer, de façon contrôlée, l'évolution du profil cognitif des élèves. Les variables associées aux connaissances et aux pratiques des enseignants ne sont ici pas prises en compte. La première des deux reconstructions que nous présentons dans le paragraphe suivant s'est vue évaluée selon les orientations définies ci-dessus [article 5].

4. Deux exemples de reconstruction

Nous avons mis notre cadre à l'épreuve de l'apprentissage de deux savoirs : la conservation du mouvement et la modélisation de la propagation de la lumière du Soleil. Pour chacun de ces savoirs nous avons donc établi un dialogue de nature essentiellement épistémologique (au sens piagétien de la construction des savoirs) entre l'histoire des savoirs en jeu (envisagée sous l'angle de l'histoire des idées) et les spécificités du système didactique auquel s'adresse la reconstruction envisagée (le profil conceptuel des élèves, les difficultés attendues, etc.). La variété (par nature) des savoirs choisis nécessite la mise en place de stratégies spécifiques d'utilisation du matériau historique. Aussi, l'analyse de ces stratégies nous permettra d'apporter une définition plus précise et plus fine de notre cadre.

4.1. Reconstruction didactique de la conservation du mouvement conçue à partir du Dialogue sur les deux grands systèmes du monde de Galilée.

Cette séquence se donne pour but l'apprentissage du principe de conservation du mouvement dans le contexte de l'émergence du principe d'inertie. Nous chercherons à dégager quelques traits spécifiques à l'élaboration de la séquence. En particulier, nous précisons la façon dont seront sélectionnés puis organisés les extraits du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée (1632) que nous avons choisi d'utiliser. L'évaluation de l'impact de cette séquence en situation réelle de classe est présentée [article 5].

Les difficultés des élèves en mécanique classique (dynamique, cinématique) ont fait l'objet d'explorations nombreuses (Viennot 1979, Saltiel & Malgrange 1980, Clement 1982, Sebastia 1984, McDermott 1984, Halloun & Hestenes 1985) dont les résultats sont régulièrement repris et synthétisés dans la littérature didactique (Picquart 2008, Mora & Herrera 2009). Nous nous intéressons ici uniquement à ceux qui concernent la question de la conservation du mouvement. La plupart des élèves et des étudiants pense que le mouvement d'un corps nécessite l'action d'un moteur. Autrement dit, lorsque deux corps A et B en contact sont en mouvement, c'est que l'un (A) joue le rôle de moteur pour l'autre (B). Si le contact entre A et B est rompu, alors B perd instantanément la vitesse correspondant à l'action de A sur B : « Le fait que l'entraînement soit compris comme une cause de mouvement pour l'objet entraîné conduit, par ricochet, à penser que la vitesse correspondante disparaît en même temps que le lien physique » (Viennot 2002). Ce type de raisonnement conduit les élèves à prévoir qu'une bille lâchée par une personne immobile sur un tapis roulant (animé d'une vitesse constante) tombera derrière cette personne (Saltiel & Viennot 1985). Dans ce cas, l'absence de lien physique avec la personne supprime la composante horizontale de la vitesse de la bille ; ne subsiste alors plus que le mouvement vertical. Un tel raisonnement n'est pas conforme avec le principe de conservation : la bille conserve le mouvement de la personne même lorsqu'elle n'est plus en contact avec elle. De ce fait (et en l'absence de frottements dus à l'air), elle tombe à ses pieds. La séquence que nous présentons est conçue en référence à cette difficulté. Elle a pour but d'aider les élèves à rompre avec l'idée d'un lien causal entre contact et mouvement afin d'approcher celle de conservation.

Les raisonnements présentés ci-dessus font très largement écho à ceux mis en scène par Galilée dans la deuxième journée de son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*. Compte tenu de cette proximité, notre séquence est construite à partir du texte de Galilée (voir annexe 4). A première vue, ce choix n'a rien d'original : l'utilisation du *Dialogue* en classe de physique est devenue un rituel de l'enseignement de mécanique, et plusieurs recherches se sont développées en vue d'en évaluer l'impact (Kaplan 1988, Garrison & Lewwill 1993, Guedj 2005). La spécificité de notre travail tient au fait que la résolution du problème à résoudre ne procède pas d'une démarche expérimentale mais d'une démarche intellectuelle de création d'une loi inconnue des élèves, démarche largement inspirée de la démarche historique.

Notre séquence d'enseignement est construite à partir de l'extrait présenté en annexe (annexe 4). Elle s'appuie sur trois hypothèses : 1) l'identification des élèves au personnage de Simplicio, 2) la reconnaissance par les élèves de l'équivalence (pour la chute) du mouvement de la Terre avec celle du navire (on néglige ici les effets d'entraînement et de Coriolis), 3) la construction (par les élèves ayant accepté cette équivalence) du principe de conservation. En effet, si les élèves se reconnaissent dans les idées de Simplicio et admettent avec lui que la pierre lâchée du haut du mât du navire tombe derrière le mât, si par ailleurs, ils admettent que ce qui se produit sur le navire devrait se produire pareillement sur Terre (i.e. dans les deux cas, un objet est entraîné par un moteur, puis détaché de celui-ci) alors ils constateront peut-être que la transposition de la situation du navire à celle d'une pierre lâchée du haut d'une tour amène à conclure à l'immobilité de la Terre. Cette situation conflictuelle devrait les conduire à mettre en place un raisonnement nouveau qui rende compatible la réalité de l'expérience du navire avec celle du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même.

La première étape de la séquence consiste à faire prévoir le lieu de chute d'une pierre lâchée d'une part du haut d'une tour, d'autre part du haut du mât d'un navire avançant à vitesse constante. L'étape 2 vise à faire admettre aux élèves l'équivalence des deux chutes de façon à les conduire vers une conclusion incongrue sous-tendue par le raisonnement suivant : si les chutes sont équivalentes, alors la pierre lâchée depuis la tour devrait tomber derrière cette dernière, ce qui n'est pas le cas, la Terre est donc immobile. Nous comptons sur l'effet produit par cette situation conflictuelle (les élèves de 15 ans savent que la Terre est en mouvement) pour que les élèves envisagent une nouvelle conclusion pour le lieu de chute de la pierre lâchée du haut du mât (étape 3) par un raisonnement proche du raisonnement attendu : la pierre conserve la vitesse du navire même lorsque le contact entre elle et le mât est rompu (étape 4).

L'efficacité du parcours d'apprentissage, évaluée dans le cadre d'une ingénierie didactique (Artigue 1988), repose sur l'acceptation par les élèves de l'équivalence de deux chutes : celle d'une pierre lâchée du haut d'une tour, celle d'une pierre lâchée du haut du mât d'un navire en mouvement rectiligne uniforme. Cette stratégie est celle utilisée par Galilée dans son *Dialogue*, à ceci près qu'historiquement, l'enjeu sous-tendu par la question du lieu de chute d'une pierre lâché du haut d'une tour est le mouvement de la Terre ; selon la physique aristotélicienne, le fait que les pierres tombent au pied des tours prouve que la Terre est immobile ; en affirmant (par l'hypothèse de la conservation du mouvement) que les pierres tombent au pied des mâts des navires en mouvement, Galilée montre que le lieu de chute d'une pierre ne donne aucune indication sur l'état de repos ou de mouvement d'un corps.

Autrement dit, le fait que les pierres tombent au pied des tours ne prouve pas l'immobilité de la Terre. Dans un contexte d'apprentissage, l'enjeu est tout autre. En effet, les élèves d'aujourd'hui savent que la Terre est mouvement, et nous avons fait de cette certitude le point d'appui de la construction du principe de conservation du mouvement. Ce faisant, nous avons introduit une dissymétrie entre l'organisation didactique des savoirs et celle, historique, choisie par Galilée dans son *Dialogue* (voir Figure 13).

Cette stratégie rappelle les principes du « retournement de situation » de Bloch en ce qu'elle permet « à la connaissance visée de devenir nécessaire pour réussir, et à la formulation de cette connaissance d'intervenir comme nécessité de justification du but atteint » (Bloch 2006, p. 102). Ici, la connaissance visée est le principe de conservation du mouvement dont la formulation par les élèves se pose comme une nécessité pour expliquer le fait que la pierre tombe au pied du mât du navire.

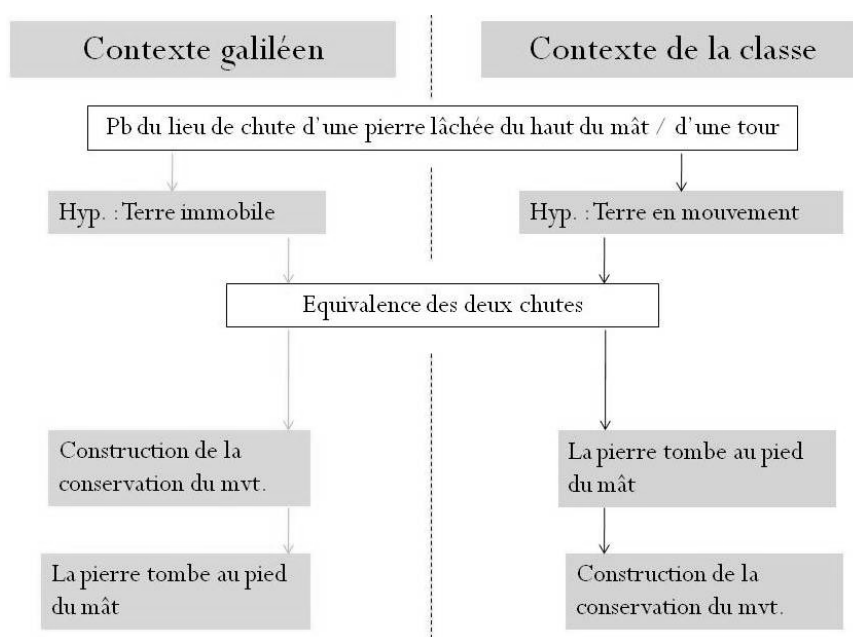


Figure 13 : Cet organigramme met en perspective l'approche choisie par Galilée dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* avec celle que nous avons mise en place en classe pour aborder la question de la conservation du mouvement.

Mis en perspective du déroulement choisi par Galilée, notre parcours d'enseignement utilise un ressort pédagogique proche de celui du savant florentin : le problème dévolu aux élèves est identique à celui proposé aux lecteurs du *Dialogue*. Seules les prémisses sont différentes : dans le cas que nous qualifierons d'historique (celui de Galilée), le savoir à construire est le mouvement de la Terre (le principe de conservation du mouvement est un intermédiaire) dans le cas scolaire, le mouvement de la Terre est une connaissance acquise qui sert d'appui pour la construction du principe de conservation du mouvement. L'outil historique guide ici le choix du problème à dévoluer aux élèves ainsi que la stratégie conduisant à sa résolution. Du point de vue des élèves ayant bénéficié de cette séquence d'enseignement, la confrontation directe avec les protagonistes du *Dialogue* favorise une entrée motivante dans l'activité proposée et suscite l'intérêt dans la mesure où possibilité leur est offerte de prendre position par rapport aux personnages mis en scène par Galilée (et

donc, par rapport à Aristote et à Galilée eux-mêmes). Cette possibilité est mise en avant par nombre d'entre eux au moment de la phase d'évaluation de la séquence **[article 5]**.

L'exemple suivant incarne de façon quelque peu différente l'idée de reconstruction didactique dans la mesure où le savoir en jeu (même si, comme le précédent, de nature contre-intuitive) est directement présenté aux élèves par l'intermédiaire d'un texte historique. Il n'est donc pas à découvrir. Toutefois, sa nécessité est amenée par la confrontation de deux modèles historiques dont l'un est aujourd'hui obsolète. Nous retrouvons-là le choix que nous avons fait lors de la construction du *Dialogue sur les manières dont se fait la vision* à ceci près que ce *Dialogue* n'était pas, en soi, un document historique.

4.2. Reconstruction didactique d'une procédure de mesure du périmètre de la Terre

La reconstruction que nous avons imaginée (voir Tableau 2) émerge de la connaissance que nous avons des difficultés des élèves à propos de la propagation de la lumière du Soleil et de la nécessité de présenter de manière explicite des éléments historiquement situés. L'architecture de cette reconstruction est directement inspirée du modèle de Monk et Osborne à ceci près (encore une fois) que le problème dévolu aux élèves n'est pas résolu par voie expérimentale, mais par voie historique. Le texte utilisé est une traduction française d'un extrait du *De Motu* et se trouve en annexe 2. La séquence telle que nous la présentons ici s'adresse à des élèves de lycée.

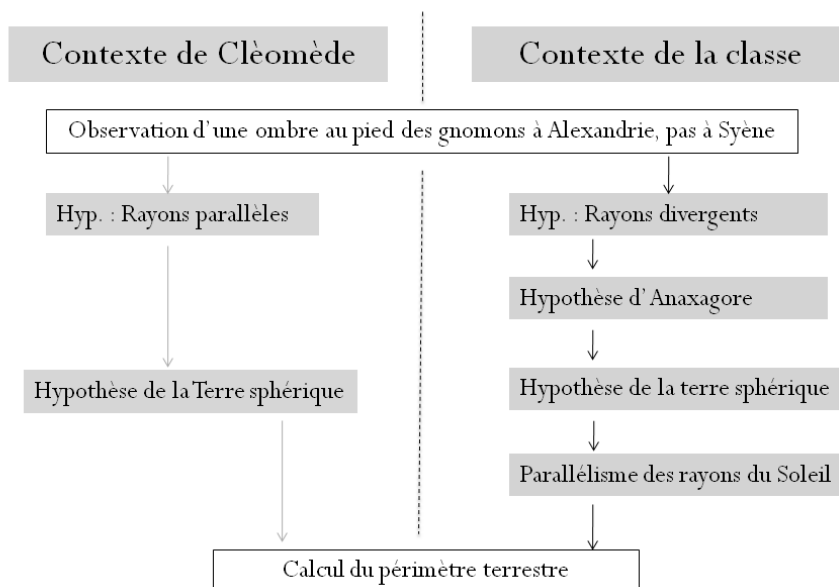


Figure 14 : Cet organigramme met en perspective l'approche choisie par Cléomède dans le *De motu* pour aborder la mesure du périmètre terrestre et notre propre reconstruction.

La première étape consiste en la présentation d'un fait d'observation (pas d'ombre au pied des gnomons situés à Assouan, une ombre aux pieds de ceux situés à Alexandrie, à midi, le

jour du solstice d'été). Les élèves sont invités à proposer un schéma d'explication dans lequel plusieurs modélisations sont susceptibles de s'exprimer (rayons divergents, parallèles, ligne entre Alexandrie et Assouan plate ou courbe...). Ces schémas d'explication sont discutés lors d'un débat collectif, et mis en perspective d'une explication qui semble avoir été suggérée par Anaxagore (voir note 17) pour proposer une première estimation de la distance Terre-Soleil³⁰. C'est l'étape 2 ; elle inclut l'idée de discriminer le modèle d'une Terre plate de celui d'une Terre sphérique en indiquant que ces observations ont contribué à construire la certitude d'une Terre sphérique. S'ensuit une étape d'étude historique dont l'objectif est d'approcher l'explication et la méthode décrites par Cléomède. Les élèves sont invités à expliciter l'architecture du texte, à retrouver les hypothèses nécessaires au calcul du périmètre terrestre, et à reproduire pas à pas la construction décrite entre les lignes 16 et 19 (voir Figure 3). A l'issue de cette étape (étape 3), les approximations et les choix faits par Cléomède sont discutés à la lumière des savoirs astronomiques en jeu (diamètre apparent du Soleil, rapport des distances, échelles...). L'étape 4 vise la construction d'une géométrisation de la propagation de la lumière du Soleil à partir d'un point. L'idée que le Soleil n'est pas une source ponctuelle peut-être discutée mais ne fait pas l'objet d'un travail spécifique ici.

La mise en perspective de l'approche choisie par Cléomède et notre propre reconstruction (Figure 14) révèlent deux parcours hétéromorphes. La dissymétrie entre les deux approches porte sur les présupposés associés à la modélisation de la propagation de la lumière du Soleil. Cette dissymétrie implique une reconstruction *de facto* que nous avons choisie de structurer autour de l'hypothèse d'Anaxagore concernant la géométrie terrestre. La dimension historique s'incarne dans l'utilisation d'un texte de première main : celui de Cléomède auquel nous n'avons apporté que de mineures modifications³¹ (voir chapitre 1). Elle s'appuie également sur un travail géométrique visant un passage à la limite (complexe) illustré par la Figure 15 ci-dessous.

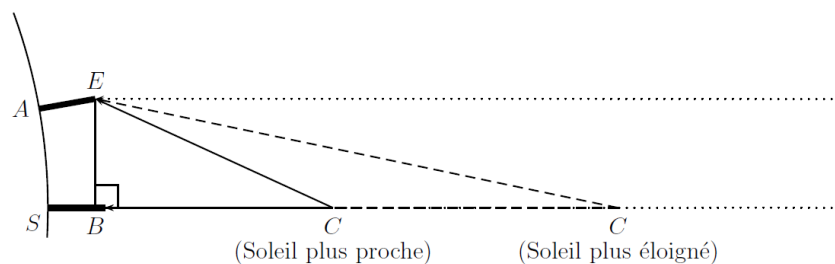


Figure 15 : Plus le Soleil C s'éloigne et plus l'angle C tend vers zéro et plus les droites passant par les points E et B tendent à devenir parallèles entre elles.

L'idée de ce travail est de partir de la représentation spontanée des élèves (voir Figure 5) et de leur montrer que lorsque le point C se déplace le long de la droite SB en s'éloignant de la Terre, l'angle C devient proche de zéro. Si l'on considère que la somme des angles dans un triangle est toujours égale à 180° et que l'angle B est un angle droit, alors lorsque C tend vers

³⁰ Cette explication repose sur l'idée que la ligne Assouan et Alexandrie est plate et sur une géométrisation de la propagation de la lumière du Soleil en rayons divergents (explication sous-tendue par l'idée que le Soleil est une source proche).

³¹ Nous avons supprimé les passages dans lesquels Cléomède évoque la notion de « plus grand cercle ».

zéro, l'angle E tend vers 90° . Ce passage à la limite conduit à conclure que lorsque le Soleil est très éloigné de la Terre, les droites passant respectivement par E et B sont parallèles entre elles. Les limites de ce travail géométrique s'appuient sur l'idée que le Soleil est une source lumineuse ponctuelle, ce qui est une approximation à discuter explicitement avec les élèves.

La séquence telle que nous la présentons ici devrait être mise en place en situation réelle de classe dans les prochains mois. Comme pour la précédente, son impact sera évalué dans le cadre de l'ingénierie didactique. En particulier, nous souhaitons nous donner les moyens d'une mesure fiable du rôle joué spécifiquement par l'outil historique dans l'acquisition des savoirs scientifiques en jeu.

Etape 1 : Présentation d'un phénomène / d'un problème à résoudre	<i>Au solstice d'été, à midi, lorsque le Soleil est au milieu de sa course, un bâton planté verticalement projette une ombre à Alexandrie alors qu'aucune ombre n'est visible à Syène, ville située sur le même méridien³². Faites un schéma où vous expliquerez les raisons de ce phénomène.</i>
Etape 2 : Propositions d'explication et confrontation	<p>Sur les schémas des élèves :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La propagation de la lumière du Soleil est figurée en lignes parallèles - La propagation de la lumière du Soleil est figurée en rayons divergents - La ligne reliant Alexandrie à Syène est courbe ou droite <p><i>Ces observations ont probablement permis à Anaxagore de calculer la première mesure de la distance Terre-Soleil. Ce calcul repose sur les hypothèses suivantes :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - La Terre est plate - Le Soleil est proche et ses rayons divergent <p><i>Comment a-t-il pu procéder ? Discutez cette méthode. Est-elle toujours valable si l'on considère que la Terre est sphérique et le Soleil très éloigné ?</i></p>
Etape 3 : Etude historique	<p>L'étude historique se fait sur la base du texte de Cléomède.</p> <p>(1) Les élèves sont invités à discuter :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'architecture du texte - Les hypothèses nécessaires au calcul du périmètre terrestre - L'instrument utilisé (le « cadran concave ») <p>(2) Les élèves sont invités à reproduire pas à pas la construction décrite entre les lignes 16 et 29 (voir Figure 3), puis à vérifier le résultat de la mesure.</p> <p>(3) Les sources d'incertitudes sont discutées.</p>
Etape 4 : Modélisation et conceptualisation	<p><i>Que pensez-vous de la 3^e hypothèse énoncée par Cléomède ? Comment peut-on montrer expérimentalement que deux droites issues d'un point très éloigné peuvent être considérées en un certain lieu comme parallèles ?</i></p> <p>(1) On peut réaliser l'expérience suivante : deux fils de 2 m de long sont attachés à une extrémité à un même clou. Lorsque les fils sont tendus, leurs extrémités sont quasi-parallèles.</p> <p>(2) Ce phénomène est expliqué à partir de la propriété de la somme des angles dans un triangle rectangle dont l'angle au sommet tend vers zéro (voir Figure 15).</p>

Tableau 2 : Proposition de reconstruction didactique pour approcher la géométrisation de la propagation de la lumière du Soleil à partir du récit de Cléomède.

³² On suppose comme acquises les notions suivantes : solstice, méridien, midi solaire, ombre, propagation rectiligne de la lumière, angles alternes égaux.

5. Conclusion

Notre projet de cadre de construction de séquences historiquement situées est né d'un constat issu des recherches consacrées aux processus de transposition didactique. Selon ces recherches, l'étude et la prise en compte des contraintes propres au monde scolaire (plus particulièrement, celui de la classe de physique) fondent la spécificité du projet de construction didactique, et par là-même, la spécificité de l'organisation des savoirs scolaires. Ceux-ci apparaissent le plus souvent selon un ordre qui a peu à voir avec l'ordre historique (Chevallard, 1991). Autrement dit, la genèse historique ne résiste pas au procès qui conduit le savoir du monde savant vers le monde scolaire puisque celui-ci est « inévitablement finalisé dans un cadre scolaire » (Joshua & Dupin 2003, p. 195). Par conséquent, la thèse « récapitulacionniste » selon laquelle il serait possible de faire passer l'individu par des étapes identiques à celles propres au développement historique de la science (Langevin 1950)³³, qui avait motivé nos premières recherches, est vite devenue peu féconde et finalement totalement vaine. Il nous a donc fallu trouver une voie alternative pour faire de l'histoire d'un concept un outil d'apprentissage tout en acceptant que le cheminement d'apprentissage proposé ne soit pas homomorphe de la genèse historique de ce concept. Il s'agissait de réussir à concilier l'idée d'une reconstruction contrainte par des exigences didactiques (un « programme » spécifique au monde de l'école), tout en ouvrant un espace au matériau historique lui-même. Selon cette perspective, les idées et les formes de raisonnements risquant de faire obstacle à l'apprentissage d'un savoir donné sont venues gouverner une exploration historique dont l'objectif visait à faire ressortir d'une part des situations ou des problèmes susceptibles d'être exploités au sein de la sphère scolaire et d'autre part des stratégies de résolution accessibles aux élèves. Ce travail dialectique entre la sphère didactique et la sphère historique a permis l'émergence de « reconstructions didactiques », nom que nous avons donné aux séquences d'enseignement conçues à partir d'une reconstruction historique et se donnant pour but l'apprentissage d'une loi ou d'un concept scientifique. Nous avons ainsi formé les contours d'un cadre pour la création de ces reconstructions, cadre qui inclut une analyse des conceptions des élèves, des difficultés et des obstacles qui marquent leur évolution ainsi qu'une analyse épistémologique et historique des contenus visés par l'enseignement.

Si cette démarche se veut prescriptive, elle ne se prétend pas pour autant normative dans la mesure où il ne s'agit pas ici de proposer un modèle général d'élaboration de séquences d'enseignement incluant des éléments d'information historiques. En effet, parmi les multiples voies explorées par les chercheurs en didactique des sciences (de Hosson & Scheeberger, 2011), nous avons choisi de suivre celle où la mise en contact effective des élèves avec l'histoire des sciences se donne pour raison essentielle l'apprentissage d'un savoir scientifique donné. Si nous avons voulu assigner à l'histoire des sciences un rôle culturel ou visant à éclairer des questions relatives à la nature de la science, nous n'aurions

³³ « Ce développement progressif de l'œuvre scientifique en ses trois étapes (*théologique, métaphysique et positiviste*), il paraît indispensable de le respecter, de le reproduire dans l'initiation donnée à l'école en l'adaptant à chaque instant au développement intellectuel des élèves qui se poursuit, conformément à la grande loi biologique, suivant un rythme parallèle à celui de l'évolution de l'espèce (...). En respectant cet ordre, en éclairant le pédagogique par l'historique on résoudra pour le mieux le problème de l'initiation scientifique » (Langevin 1950, p. 215).

probablement pas procédé de cette façon. Les travaux menés dans ce contexte, affichent un attachement plus affirmé l'étude des échanges épistolaires, à la présentation des contextes de production du savoir, à l'analyse des débats et des controverses³⁴. D'ailleurs, telles que nous les envisageons, nos reconstructions didactiques reposent sur une histoire des idées que l'on pourrait qualifier de « jugée » (Bachelard, 1972, p. 141), ou pour le moins, sur une histoire des « vainqueurs » (Pestre, 1995, p. 489), dans la mesure où notre démarche vise en quelque sorte à mettre les élèves en situation de disqualifier des savoirs aujourd'hui « périmés » (Bachelard, *op. cit.*). Il ne s'agit pas ici d'utiliser l'histoire des sciences en tant qu'outil de « confrontation de visions du monde » (Albe, 2007, p. 164) et moins encore comme moyen de « reconnaître la part inévitable d'incertitudes, de polémiques dans les démarches scientifiques » (Albe, *op. cit.*, p. 147). En ce sens, notre travail ne se pose pas comme une contribution aux recherches visant à faire de l'éducation scientifique une formation sur la science et ses méthodes mais bien une formation aux lois et aux concepts de la science. Il s'agit là d'un choix pragmatique qui n'a rien d'idéologique. Simplement, face aux réticences souvent exprimées par les enseignants qui, par manque de temps relèguent l'apport d'information historique au rang de « cerise sur le gâteau de l'enseignement » (Guedj & Dusseau, *op. cit.*) et face aux défaillances de séquences telles que celle visant à faire reproduire la procédure de mesure du périmètre terrestre par la méthode d'Eratosthène, nous avons souhaité proposer une voie où l'enseignement promeut une histoire différente des galeries de portraits et des hagiographies des savants illustres qui rythment les manuels scolaires (Slisko, 2008), une histoire au service de l'apprentissage de la physique.

La nécessaire visibilité du matériau historique ne s'est pas posée d'emblée, dans notre travail, comme une évidence. Rappelons, par exemple, que le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*, première tentative de « reconstruction didactique », n'est pas un document historique. Mais l'évaluation de la séquence conçue à partir du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée indique qu'à sa dimension historique explicite sont associés des avantages pédagogiques significatifs. A titre d'exemple, et ainsi que nous l'indiquons à la fin de **[article 5]**, les élèves apprécient de constater que leurs propositions de réponse au problème du lieu de chute de la pierre du haut du mât sont semblables à celles du *Dialogue*. L'identification consciente des élèves aux personnages mis en scène par Galilée semble légitimer leurs interventions et permet la mise en place de conditions pédagogiques propices à la construction d'un savoir nouveau. Bien entendu, nous avons aujourd'hui trop peu d'éléments pour conclure à l'efficacité en termes d'apprentissage de la mise en contact effective des élèves avec des éléments de nature historique. Toutefois, le cadre que nous avons développé, par son caractère prescriptif, offre la possibilité d'accéder à un nombre plus important de données. A titre d'exemple, appliquée à une situation réelle de classe, l'évaluation de la reconstruction didactique d'une procédure historique de mesure du périmètre terrestre devrait nous permettre d'affiner nos conclusions. Celles-ci pourront également bénéficier de la mise à l'épreuve de la classe de la reconstruction didactique du concept de gravitation actuellement en cours d'élaboration. L'application répétée de notre cadre à un nombre représentatif de savoirs scientifiques pourrait d'ailleurs conduire à identifier certaines spécificités des savoirs qui se prêtent au jeu de la reconstruction telle que nous l'avons définie. Par exemple, il n'est pas certain qu'une reconstruction didactique

³⁴ Nous renvoyons ici à nouveau aux recherches anglo-saxonnes qui réfèrent à l'acronyme NOS (nature of science) et plus récemment, en France, aux travaux de Maurines et Beaufils (Maurines *et al.* 2009).

de la pression atmosphérique soit pertinente, l'approche microscopique semblant plus efficace, en termes cognitifs, qu'une approche macroscopique associant eau et air sous un même concept unificateur (le concept de fluide) et s'appuyant sur l'exploitation de l'expérience barométrique de Torricelli³⁵.

Si notre cadre suggère que nos séquences d'enseignement débutent par l'exposition d'un problème à résoudre, il n'impose pas pour autant une stratégie pédagogique de résolution unique et uniforme de ce problème. Celle-ci est en effet largement dépendante de la stratégie telle qu'elle apparaît dans la reconstruction utilisée comme référent historique. Toutefois, le principe du « retournement de situation » (Bloch, 2006) et la confrontation des élèves à un énoncé « impossible » se retrouvent dans les deux séquences que nous avons présentées. Dans le cas de la construction de la conservation du mouvement, le rapprochement de deux situations apparemment identiques (la chute d'une pierre d'une hauteur d'une tour / du haut du mât d'un navire en mouvement rectiligne uniforme) conduit les élèves à formuler une conclusion (provisoire) qu'ils savent erronée (« la Terre est immobile ») ; l'incongruité de cette conclusion les amène à modifier leur raisonnement, à imaginer que les pierres lâchées du haut du mât tombent au pied des mâts et finalement à construire l'idée que pour que cela soit, il faut nécessairement que les pierres conservent le mouvement des mâts d'où elles sont lâchées. Plus généralement, cette démarche consiste à présenter aux élèves le résultat d'une observation ou d'une expérience (historique) « c » (dans l'exemple précédent, la pierre tombe au pied de la Tour et de la même façon au pied du mât d'un navire en mouvement rectiligne et uniforme), et à leur demander les conditions sur « a » et « b » pour que « c » soit vérifiée connaissant « a » et « b ». Dans notre cadre, « a » (la Terre est en mouvement) est une connaissance que l'on suppose disponible et « b » (le mouvement de la Terre se conserve) la connaissance à construire. Ce processus didactique est rendu possible par la construction scénarisée d'une incohérence, d'une conclusion non conforme au savoir de référence (que l'on suppose connu des élèves) élaborée à partir de leur profil conceptuel.

C'est par une stratégie assez semblable qu'est approché le parallélisme des rayons du Soleil. La présentation de l'observation des ombres au pied des obélisques de Syène et d'Alexandrie le jour du solstice d'été à midi (c) se donne pour objectif de permettre aux élèves de proposer des schémas dans lesquels la ligne reliant Alexandrie et Syène est tantôt courbe, tantôt plate ; dans tous les cas, les rayons issus du Soleil sont divergents. Le fait que les élèves savent que la Terre est ronde (a) (et que les différences observées concernant les ombres égyptiennes en est l'une des manifestations) doit les conduire à revoir la façon dont ils géométrisent la propagation de la lumière du Soleil (b)³⁶. Le texte de Cléomède se pose comme une aide à une géométrisation (i.e. en rayons parallèles) de la propagation de la lumière du Soleil.

³⁵ Précisons toutefois que nous avons conçu et testé une séquence d'enseignement à partir de certains éléments de l'histoire du concept de pression atmosphérique [article 3]. Il s'agit d'une séquence d'enseignement de technologie pour l'école primaire (cycle 3) qui vise à conduire les élèves à comprendre le fonctionnement de la pompe d'al-Jaziri (de Hosson *et al.*, 2009).

³⁶ Les expressions « Terre plate » / « Terre sphérique » renvoient ici à une extension de la forme de la ligne reliant Alexandrie à Syène.

Il nous semble intéressant de noter que cette stratégie est également à l'œuvre dans certaines séquences élaborées par d'autres chercheurs. C'est le cas par exemple de la séquence proposée par Merle (Merle, 2002) pour conduire des élèves de primaire à construire la notion géométrique d'horizon. Précisons que cette démarche n'est ni explicitée, ni revendiquée par l'auteure elle-même, ce qui confère à notre cadre un caractère descriptif. Cette séquence prend appui sur un argument développé par Aristote pour prouver la sphéricité de la Terre : la modification de l'aspect du ciel nocturne pour des observateurs se dirigeant vers le Sud³⁷. On demande aux élèves d'expliquer pourquoi des observateurs situés en au nord et au sud d'un même méridien ne voient pas les mêmes étoiles dans le ciel (c). Comme dans le cas de la séquence précédente, les schémas produits laissent apparaître une ligne méridienne tantôt plate, tantôt courbe, tandis que le champ de vision de chacun des observateurs se voit figuré, dans la plupart des cas, par un cône relativement aigu. Si cette façon de géométriser l'espace visible d'un observateur rend parfaitement compte des observations décrites par Aristote, elle ne permet pas de discriminer l'idée d'une Terre plate de celle d'une Terre ronde. En fait, l'outil de géométrisation utilisé par Aristote pour délimiter le champ de vision n'est pas un cône, mais une ligne tangente au cercle terrestre aujourd'hui connue sous le nom de ligne d'horizon et qui constitue le savoir visé par la séance de Merle (b). Là encore, nous nous trouvons face à une dissymétrie (non explicitement caractérisée par l'auteur) entre les hypothèses et les enjeux historiques d'une part, didactiques d'autre part : d'un point de vue historique, la notion d'horizon sert de modèle explicatif des changements d'aspects du ciel nocturne pour asseoir l'idée d'une Terre sphérique ; d'un point de vue didactique, les changements d'aspect du ciel comme manifestation de la sphéricité de la Terre permettent la construction de la notion d'horizon. Là encore, les élèves sont confrontés à une incohérence puis conduits à reconnaître que leur outil de raisonnement « spontané » ne leur permet pas de conclure que la Terre est ronde (a). Cette incompatibilité entre la démonstration d'Aristote et leurs propres conclusions les amène à construire un nouvel outil de géométrisation du champ de vision dont l'émergence est appuyée par une modélisation du phénomène à l'aide de maquettes en carton représentant la surface terrestre (ou plus exactement, une portion de ligne méridienne). Ici, l'histoire des sciences n'est pas partie prenante du processus de résolution du problème posé aux élèves mais la démarche proposée par Merle obéit de façon assez remarquable à la plupart des principes qui définissent notre cadre. Elle assoit également l'hypothèse selon laquelle une reconstruction didactique se présentant comme dissymétrique de la reconstruction historique de référence peut bénéficier du principe consistant à placer les élèves face à une incohérence ; ceci, à condition que le savoir d'appui pour les élèves soit le savoir visé par l'épisode historique utilisé. La vérification de cette hypothèse constitue une des perspectives à moyen terme de cette recherche.

A plus long terme, l'une des perspectives majeures de ce travail sera de mesurer la façon dont les enseignants de sciences physiques reçoivent les reconstructions que nous avons

³⁷ « Ainsi les astres qui sont au-dessus de notre tête subissent un changement considérable, et ils ne nous semblent plus les mêmes, selon qu'on va au midi, ou au nord. Il y a certains astres qu'on voit en Égypte et à Chypre, et qu'on ne voit plus dans les contrées septentrionales. Certains astres, au contraire, qu'on voit constamment dans les contrées du nord, se couchent quand on les considère dans les contrées que je viens de nommer. Ceci prouve non seulement que la forme de la terre est sphérique, mais encore que sa sphère n'est pas grande; car autrement on ne verrait pas de tels changements pour un déplacement si petit ». Aristote, *Traité du ciel*, II, chap. 14, 298b.

imaginées. Nous envisageons pour cela la mise en place de formations incluant la mise en place en situation réelle de classe d'une (ou plusieurs) reconstruction(s) par les enseignants formés. Nous suivons en cela le schéma de formation proposé par Mathé dans sa thèse (Mathé, 2010). La mesure des écarts entre les pratiques effectives des enseignants (notamment en termes d'adaptation), et le résultat de nos propres expérimentations nous permettront d'affiner nos reconstructions en optimisant leur opérationnalité.

6. Bibliographie

- Albe, V. (2009), Enseigner des controverses, Presses Universitaires de Rennes.
- Allchin, D. (1999). Values in science: an educational perspective. *Science and Education*, n° 8, p. 1-12.
- Aristote (1999). *Physique*, trad P.Pelligrini. Paris : Flammarion.
- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique, *Recherche en Didactique des Mathématiques*, 9 (3), 281-308.
- Bachelard, G. (1972). *L'engagement rationaliste*, Paris : PUF.
- Berthelot, J.M. (2002). Pour un programme sociologique non réductionniste en étude des sciences, *Revue Européenne des sciences sociales*, 40 (124), 233-252.
- Bloch, I. (2006). Quelques apports de la théorie des situations à la didactique des mathématiques dans l'enseignement secondaire et supérieur, Habilitation à diriger les recherches, Université Paris Diderot-Paris 7.
- Bowen, A. (2008). Cleomedes and the measurement of the Earth: a question of procedures. *Centaurus*, 50 (1-2), 195-204.
- Caillarec, B. (2007). Raisonnements d'étudiants sur la notion de pression. Mémoire de tutorat (dir. C. de Hosson), LDSP, Université Paris 7.
- Canguilhem, G. (1990), *Etude d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris : Vrin.
- Chauvet, F. (1996). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur, *Didaskalia*, 8, 61-79.
- Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble : La Pensée Sauvage (2e édition revue et augmentée, en coll. avec Marie-Alberte Joshua).
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics, *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- Crépin, P. (2005). Comment se construisent des problèmes au cours des débats scientifiques : étude comparée épistémologique et didactique à propos du concept de fossile. Place et rôle de l'enseignant dans la gestion des débats, Actes des quatrièmes rencontres de l'ARDIST, 12-15 octobre 2005, Lyon (France).
- Crépin, P. (2009). Problématisation comparée d'un débat scolaire et d'une controverse historique à propos de l'origine des coquilles fossiles, 6e journées scientifiques de l'ARDIST, Nantes, 14-16 octobre 2009.
- Decamp, N & de Hosson, C. (2010). Implementing Eratosthenes' discovery in the classroom: some educational cares, *Science and Education* (published on line, august 11th 2010: DOI: 10.1007/s11191-010-9286-3).

- de Hosson, C. (2011). Una controversia histórica al servicio de una situación de aprendizaje: una reconstrucción didáctica basada en Dialogo sobre los dos máximos sistemas del mundo de Galileo, *Enseñanza de la Ciencias*, 29 (1), 115-126.
- de Hosson, C. (2004). Contribution à l'analyse des interactions entre histoire des sciences et didactique. Un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- de Hosson, C. & Caillarec B. (2009). Students' ideas about Blaise Pascal experiment at the Puy de Dôme Mountain, *Latin American Journal of Physics Education*, 3 (2), 207-213.
- de Hosson, C., Chesnais L. & Fourcade J. (2009). Comment élever l'eau d'une rivière ? A la découverte de la Pompe d'al-Jaziri, in. Djebbar A., de Hosson C. & Jasmin D. (eds), *Découvertes en pays d'Islam*, Paris : Le Pommier.
- de Hosson, C. & Decamp, N. (2011). La procédure de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Ératosthène » : un support pour une reconstruction didactique. *Grand N*, 87, 77-91.
- de Hosson, C. & Delaye, V. (2009). Comment voit-on les objets qui nous entourent ? A la découverte de la lumière, in. Djebbar A., de Hosson C. & Jasmin D. (eds), *Découvertes en pays d'Islam*, Paris : Le Pommier.
- de Hosson, C. & Kaminski, W. (2007). Historical controversy as an educational tool. Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the "Dialogue on the ways that vision operates". *International Journal of Science Education*. 29 (5), 617-642.
- de Hosson, C. & Kaminski, W. (2006). Un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision inspiré de l'histoire des sciences : compte-rendu d'innovation, *Didaskalia*, 28, 101-124.
- de Hosson C. & Kaminski W. (2002). Les yeux des enfants sont-ils des "porte-lumière" ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*. 840, 143-160.
- de Hosson, C. & Schneeberger, P. (2011). Orientations récentes du dialogue entre recherche en didactique et histoire des sciences, *Recherches en Didactique des Sciences et de la Technologie*, 3.
- Delambre, J.-B. (1817 et 1819). *Histoire de l'astronomie ancienne et Histoire de l'astronomie moderne*.
- Di Folco, E. & Jasmin, D. (2003). Mesurer la Terre avec un bâton : sur les pas d'Ératosthène, *ASTER*, 36, 163-167.
- Doat, T., Parizot, E. & Vézien J.M. (2011). A carom billard to understand special relativity, *IEEE Conference*, march 19th-23rd 2011, Singapore, 201-202.
- Dorier, J.L. (2006). Recherche en histoire et en didactique des mathématiques sur l'algèbre linéaire, perspectives théoriques sur leurs interactions, *Cahiers Leibniz*, 12 : Grenoble.
- Ducourant, D. (2007). L'observation d'Ératosthène en cinquième avec deux punaises, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 101, 825-841.

- Duhem, P. (1906). *La Théorie physique, son objet, sa structure*. Paris : Vrin.
- Duit, R. (2007). Science education research internationally: Conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(1), 3-15.
- Dutka, J. (1993). Eratosthenes' measurement of the Earth reconsidered, *Arch. Hist. Exact Sci.*, 46 (1), 55–66.
- Farges, H., Di Folco, E., Hartmann, M. & Jasmin, D. (2002). *Mesurer la Terre est un jeu d'enfant : Sur les pas d'Ératosthène*, Paris : Le Pommier.
- Feigenberg, J., Lavrik, J.V. & Shunyakov, V. (2002). Space scale: models in the history of science and students mental models, *Science and Education*, 11 (4), 377-392.
- Galilée, G. (1632). *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. M. Clavellin (1999), Paris : Seuil.
- Galili, I. & Hazan, A. (2001). The Effect of a History-Based Course in Optics on Students Views about Science', *Science & Education* 10 (1-2), 7-32.
- Galili, I. & Hazan, A. (2000). The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis, *A Supplement to the American Journal of Physics* 68 (7), S3–S15.
- Garrison, J.W. & Lawwill, K.S. (1993). Democratic science teaching: a role for history of science, *Interchange*, 24 (1-2), 29-39.
- Goldstein, B. (1984). Eratosthenes on the "measurement" of the Earth, *Historia Mathematica*, 11, 411-416.
- Gohau, G. (2002). Redécouverte d'hier à aujourd'hui, in N. Hulin (dir.), *Sciences naturelles et formation de l'esprit. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902*, Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaire du Septentrion, 163-181.
- Goulet, R. (1980). *Cléomède : Théorie élémentaire*, Vrin : Paris.
- Guedj, M. (2005). Utiliser des textes historiques dans l'enseignement des sciences physiques en classe de seconde des lycées français : compte-rendu d'innovation. *Didaskalia*, 26, 75-95.
- Guedj, M. & Dusseau, M. (1999). A propos d'une formation des enseignants de sciences physiques à l'épistémologie et à l'histoire des sciences, *Bulletin de l'union des physiciens*, 815, 991-1005.
- Halloun, I.A. & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion, *American Journal of Physics*, 53, 465-467.
- Höttecke, D., Henke, A. & Reib, F. (2010). Implementing history and philosophy in science teaching. Strategies, methods, results and experiences from the European project HIPST. *Science and Education*. Disponible en ligne : <<http://dx.doi.org/10.1007/s11191-010-9330-3>>.
- Hulin, N. (1984). L'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique. *Revue Française de Pédagogie*, 66, 15-27

- Irwin A. (2000). Historical case studies: teaching the Nature of Science in context, *Science education*, 84 (1), 5-26.
- Joshua, S. & Dupin, J.J. (2003). Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques, Paris : PUF.
- Kaplan, A. (1992). Galileo: an experiment in interdisciplinarity education, *Curriculum Inquiry*, Blackwell publishers : Toronto. 255-288.
- Kipnis, N. (2001). Historical controversies in teaching science : the case of Volta, *Science and Education*, 10 (1-2), 33-49.
- Koyré, A. (1973). Perspective sur l'histoire des sciences, Etude d'histoire de la pensée scientifique, Paris : Gallimard.
- Kubli, F. (2001). Galileo's "jumping hill" experiment in the classroom. A constructivist's analysis, *Science and Education*, 10 (1-2), 145-148.
- Langevin P. (1964). La Pensée et l'action. Paris, Editions Sociales.
- Laugier A. & Dumon A. (2000). Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde. *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 826, pp. 1261-1283.
- Lochhead, J. & Dufrence, R. (1989). Helping students understand difficult concepts through the use of dialogues with history, in D. E. Herget (ed.), *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Tallahassee, Florida State University.
- Mathé, S. (2010). Thèse de doctorat, Université Paris Diderot-Paris 7.
- Mathe, S., Méheut, M. & de Hosson, C. (2008). La démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 32, 41-76.
- Matthews, M. (1989). A role for history and philosophy in science teaching. *Interchange*, 20, 3-15.
- Matthews, M. (1994). *Science teaching: The role of history and philosophy of science*. London: Routledge.
- Maurines, L. & Mayrargues, A. (2007). Utiliser l'histoire de l'optique dans l'enseignement, pourquoi ? Comment ? Actes des journées nationale de l'UdPPC, octobre 2007, Paris.
- Maurines, L., Beaufils, D. & Chapuis (2009). Travailler l'image de la nature de la science et de l'activité scientifique grâce à l'histoire des sciences, Actes des 6e journées scientifiques de l'ARDIST, 14-16 octobre 2009, Nantes (France).
- McDermott, L.C. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics, *Physics Today*, 24-32.
- Merle, H. (1994). Sensibilisation à l'histoire des sciences d'enfants de 9 à 11 ans : l'expérience d'Eratosthène. Actes des 17e journées internationales sur l'enseignement des sciences, Giordan A., Martinand J.L. & Raichvarg D. (eds), 475-480.
- Merle, H. (2002). Histoire des sciences et sphéricité de la Terre, compte-rendu d'innovation, *Didaskalia*, 20, 115-136.

- Monk, M. & Osborne, J. (1997). Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: a model for the development of pedagogy. *Science Education*, vol. 81 (4), pp. 405-424.
- Mora, C. (2009). Una revision sobre ideas previas del concepto de fuerza, *Latin American Journal of Physics Education*, 3 (1), 72-86.
- Pestre, D. (1995). Pour une histoire sociale et culturelle des sciences. Nouvelles définitions, nouveaux objets, nouvelles pratiques. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*. 3, 487-522.
- Picquart, M. (2008). Que podemos hacer para lograr un aprendizaje significativo de la fisica ? *Latin American Journal of Physics Education*, 2 (1), 29-35.
- Rudge, D. & Howe, M. (2004). Incorporating history into the science classroom, *The Science Teacher*, 71 (9), 52-57.
- Saltiel, E. & Hartmann, M. (2005). L'air est-il de la matière ? Site internet de La main à la pâte : http://lamap.inrp.fr/bdd_image/1125_Lair11b.pdf.pdf
- Saltiel, E. & Viennot L. (1985). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students? GIREP; Utrecht.
- Saltiel, E. & Malgrange, J.L. (1980). Spontaneous ways of reasoning in elementary kinematics, *European Journal of Physics*, 1 (73),
- Sebastia, J.M. (1984). Fuerza y movimiento : la interpretacion de los estudiantes, *Ensenanza de las ciencias*, 2, 161-169.
- Slisko, J. (2008). La historia de la fisica en la ensenanza. Desde los objetivos curriculares hasta la practica docente. *El Cronopio*, 16-21.
- Solomon, J., Duveen, J., Scot, L., & McCarthy, S. (1992). Teaching about the nature of science through history: Action research in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 409-421
- Steffe, L., & D'Ambrosio, B. (1996). Using the teaching experience to enhance understanding of students' mathematics. In D. Treagust, R. Duit, & B. Fraser (Eds.). *Improving teaching and learning in science and maths* (65-77). New York: Teachers College Press.
- Strauss & Corbin (1994). *Grounded theory methodology: An overview*. Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (Eds.), *Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, SAGE Publications, 273-285.
- Torricelli, E. (1919). Letter to Michelangelo Ricci concerning the barometer (1644). *Collected Works*, vol. 3 . New York, McGraw-Hill.
- Ternant, M. (2006). *Eléments d'évaluation du Dialogue sur les manières dont se fait la vision*, Mémoire de tutorat (dir. C. de Hosson), Université Paris 7.
- Verret, M. (1975). *Le Temps des études*, Paris : Librairie Honoré Champion
- Viennot, L. (1979). *Le Raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris : Hermann.
- Viennot, L. (2002). *Raisonnement en physique, la part du sens commun*, Bruxelles : De Boeck.

Annexe 1 : Formes prises par la découverte d'Eratosthène dans les activités proposées par les manuels scolaires et par les *Documents d'accompagnement* de sciences physiques de la classe de 2nde (programme 2001).

Ouvrage	Organisation de l'activité	Iconographie	Questions posées	Commentaires
Bordas 2004	<p>Énoncé d'observations faites à midi au solstice : ombre au pied d'un bâton à Alexandrie, Soleil qui éclaire le fond d'un puits à Syène.</p> <p>Énoncé du résultat de la mesure de l'angle au sommet du bâton à partir de la mesure de l'ombre : « $1/50^{\circ}$ de cercle soit $7,2^{\circ}$ »</p> <p>Énoncé d'hypothèses : distance entre les deux villes, sphéricité de la Terre, parallélisme des rayons du Soleil du fait de son éloignement.</p> <p>Présentation des hypothèses exploitées par Anaxagore à propos des mêmes faits d'observations : Terre plate, Soleil proche</p>	<p>Carte d'Égypte</p> <p>Schéma visant à expliquer la formation de l'ombre au pied du bâton planté à Alexandrie</p> <p>Portrait d'Anaxagore</p>	<p>Faire un schéma rendant compte des observations.</p> <p>Expliquer pourquoi l'angle au sommet du bâton est égal à l'angle entre les droites joignant le centre de la Terre aux deux villes.</p> <p>Calcul de la valeur du rayon de la Terre à partir de la valeur $7,2^{\circ}$.</p> <p>Calcul de la valeur de la distance Terre-Soleil à partir des hypothèses d'Anaxagore.</p>	<p><i>Dans le schéma visant à expliquer la formation de l'ombre au pied du bâton à Alexandrie, le Soleil est représenté petit et proche du bâton ; un rayon unique issu de ce Soleil est dessiné.</i></p> <p><i>Le parallélisme des rayons du Soleil n'est pas questionné</i></p> <p><i>Le protocole présenté ne fait pas intervenir le cadran hémisphérique si bien que l'on peine à comprendre comment est obtenue la mesure de $1/50^{\circ}$ de cercle qui conduit à $7,2^{\circ}$.</i></p> <p><i>La mise en perspective des deux approches (Eratosthène et Anaxagore) aurait pu être l'occasion d'une discussion autour de l'hypothèse du parallélisme.</i></p>
Bréal, 2000	<p>Récit romancé dans lequel sont énoncés les observations suivantes : ombre au pied d'un bâton à Alexandrie, Soleil qui éclaire le fond d'un puits à Syène).</p> <p>Énoncé du résultat de la mesure de l'angle : « $7^{\circ}10'$ soit à peu près $1/50^{\circ}$ de tour complet).</p> <p>Énoncé de la mesure de la distance entre Syène et Alexandrie grâce aux bématisistes.</p>	<p>Schéma visant à expliquer les observations énoncées dans le texte.</p>	<p>Aucune</p>	<p><i>Le parallélisme des rayons du Soleil n'est pas mentionné dans le récit mais est utilisé (sans être questionné) dans le schéma qui accompagne le récit. La représentation de la propagation de la lumière du Soleil est discutable.</i></p> <p><i>Le protocole présenté ne fait pas intervenir le cadran hémisphérique si bien que l'on peine à comprendre comment est obtenue la mesure de $7,2^{\circ}$.</i></p>
Hachette 2000	<p>Énoncé d'observations faites à midi au solstice : ombre au pied d'un obélisque à Alexandrie, Soleil qui éclaire le fond d'un puits à Syène.</p> <p>Énoncé des mesures suivantes : la mesure de la longueur de l'ombre est huit fois plus petite que celle de l'obélisque.</p>	<p>Schéma visant à expliquer les observations énoncées dans le texte.</p>	<p>Calcul de la valeur de l'angle au sommet de l'obélisque.</p> <p>Calcul de la valeur de l'angle entre les droites joignant le centre de la Terre aux deux villes.</p> <p>Calcul de la circonférence de la Terre à partir de la distance entre les deux villes.</p>	<p><i>Le parallélisme des rayons du Soleil n'est pas mentionné dans le texte mais est utilisé (sans être questionné) dans le schéma qui accompagne le récit.</i></p> <p><i>La démarche du questionnement est anachronique : les calculs à réaliser nécessitent l'utilisation de la tangente, notion indisponible à l'époque d'Eratosthène (et de Cléomède).</i></p> <p><i>Le protocole présenté ne fait pas intervenir le cadran hémisphérique, ce qui explique le passage par la trigonométrie.</i></p>
Hatier 2000	<p>Énoncé d'hypothèses : sphéricité de la Terre, parallélisme des rayons du Soleil (du à son éloignement), Syène située le long du tropique du Cancer.</p> <p>Énoncé d'observations faites à midi au solstice : ombre au pied d'un gnomon à Alexandrie, pas d'ombre au pied d'un gnomon planté à Syène.</p> <p>Énoncé de la mesure de l'angle au sommet du gnomon d'Alexandrie : « environ 7° » à partir de la mesure de « la longueur de l'ombre du gnomon à Alexandrie ».</p> <p>Énoncé de la valeur de la distance entre Syène et Alexandrie.</p>	<p>Schéma visant à expliquer les observations énoncées dans le texte.</p>	<p>Question portant sur la position de Syène sur la Terre.</p> <p>Question portant sur la signification de « midi ».</p> <p>Question portant sur la notion de « verticalité »</p> <p>Calcul de la circonférence de la Terre à partir de la valeur de l'angle, de la distance entre les deux villes et du parallélisme des rayons du Soleil.</p> <p>Discussion sur les causes de « l'erreur » d'Eratosthène.</p>	<p><i>Le parallélisme des rayons n'est pas mentionné dans le texte. Il figure dans le schéma et est donné comme hypothèse au moment du calcul de la circonférence de la Terre.</i></p> <p><i>Le protocole présenté ne fait pas intervenir le cadran hémisphérique si bien que l'on peine à comprendre comment est obtenue la mesure de $1/50^{\circ}$ de cercle qui conduit à $7,2^{\circ}$.</i></p> <p><i>Il est question « d'erreur » là où il aurait sans doute été préférable de parler d'incertitude de mesure.</i></p>

Ouvrage	Organisation de l'activité	Iconographie	Questions posées	Commentaires
Nathan, 2000	<p>Récit rapportant les hypothèses ayant permis à Anaxagore de calculer la distance Terre-Soleil (Terre plate, Soleil proche dont la propagation peut-être figurée en rayons divergents) à partir d'observations faites à midi au solstice : ombre au pied d'un gnomon à Alexandrie, pas d'ombre au pied d'un gnomon planté à Syène.</p> <p>Énoncé des observations ayant conduit à la remise en cause de l'idée de Terre plate (Éclipse de Lune).</p> <p>Récit du « calcul d'Eratosthène » : énoncé de la règle des angles alterne égaux à partir d'une « propriété des parallèles », énoncé de la mesure de l'angle « des rayons du Soleil par rapport à la verticale d'Alexandrie », énoncé de la distance entre Syène et Alexandrie, énoncé du calcul à effectuer.</p>	<p>Photographie d'une éclipse de Lune</p> <p>Schéma des observations énoncées dans le paragraphe consacré au « calcul d'Eratosthène ».</p>		<p><i>Le calcul de la circonférence repose sur la mesure de l'angle des rayons du Soleil par rapport à la verticale d'Alexandrie et est sensé mettre en jeu un « calcul trigonométrique simple » à une époque où la tangente n'existe pas.</i></p> <p><i>Pas de mention de la scaphe.</i></p> <p><i>Le parallélisme est posé comme une alternative à l'hypothèse des rayons divergents d'Anaxagore mais ne fait pas l'objet d'une construction spécifique.</i></p> <p><i>La mise en perspective des deux « jeux d'hypothèses » permet aux élèves d'approcher certains aspects de la nature de la science, notamment la notion de modèle et d'hypothèse.</i></p>
TP (1) des Documents d'acc.	<p>Récit de la méthode utilisée par les « Anciens » pour calculer le périmètre de la Terre à partir de l'énoncé d'observations (lumière au fond d'un puits à Syène, pas à Alexandrie à midi au solstice), d'hypothèses (parallélisme des rayons du Soleil, Terre sphérique, Syène et Alexandrie situées le long du même méridien) et de mesures (angle que font les rayons du Soleil avec la verticale à Alexandrie, distance entre Syène et Alexandrie).</p>	<p>Carte d'Égypte</p> <p>Schéma visant à expliquer les observations énoncées dans le texte.</p>	<p>Dire à partir de la carte d'Égypte si Syène et Alexandrie sont effectivement situées sur le même méridien.</p> <p>Justifier le parallélisme des rayons du Soleil.</p>	<p><i>Le récit ne fait mention d'aucun instrument de mesure si bien que l'on peine à comprendre comment est obtenue la mesure de 7,5°.</i></p> <p><i>Le parallélisme des rayons du Soleil fait l'objet d'un questionnement en soi.</i></p>

Annexe 2 : Extrait du texte de Cléomède (trad. R. Goulet).

Qu'il soit admis pour nous, premièrement que Syène et Alexandrie sont établies sous le méridien, deuxièmement que la distance entre les deux cités est de 5000 stades, troisièmement que les rayons envoyés de différents endroits du soleil sur différents endroits de la Terre sont parallèles ; en effet, les géomètres supposent qu'il en est ainsi. Quatrièmement que ceci soit admis comme démontré auprès des géomètres, que les droites sécantes des parallèles forment des angles alternes égaux, cinquièmement que les arcs de cercle qui reposent sur des angles égaux sont semblables, c'est à dire qu'ils ont la même similitude et le même rapport relativement aux cercles correspondants, ceci étant démontré aussi chez les géomètres. Lorsqu'en effet les arcs de cercle reposent sur des angles égaux, quel que soit l'un (d'entre eux) s'il est la dixième partie de son propre cercle, tous les autres seront les dixièmes parties de leurs propres cercles.

Celui qui pourrait se prévaloir de ces faits comprendrait sans difficulté le cheminement d'Eratosthène qui tient en ceci : il affirme que Syène et Alexandrie se tiennent sous le même méridien (...). Il dit aussi, et il en est ainsi, que Syène est située sous le tropique de l'été. A cet endroit, au solstice d'été, lorsque le Soleil est au milieu du ciel, les gnomons des cadrans solaires concaves sont nécessairement sans ombres, le soleil se situant exactement à la verticale (...). A Alexandrie à cette heure-là, les gnomons des cadrans solaires projettent une ombre, puisque cette ville est située davantage vers le nord que Syène (...).

Si nous nous représentons des droites passant par la Terre à partir de chacun des gnomons, elles se rejoindront au centre de la Terre. Lorsque donc le cadran solaire de Syène est à la verticale sous le soleil, si nous imaginons une ligne droite venant du soleil jusqu'au sommet du gnomon du cadran, il en résultera une ligne droite venant du soleil jusqu'au centre de la Terre. Si nous imaginons une autre ligne droite à partir de l'extrémité de l'ombre du gnomon et reliant le sommet du gnomon du cadran d'Alexandrie au soleil, cette dernière ligne et la ligne qui précède seront parallèles, reliant différents points du Soleil à différents points de la Terre. Sur ces droites donc, qui sont parallèles, tombe une droite qui va du centre de la terre jusqu'au gnomon d' Alexandrie, de manière à créer des angles alternes égaux; l'un d'eux se situe au centre de la Terre à l'intersection des lignes droites qui ont été tirées des cadrans solaires jusqu'au centre de la Terre, l'autre se trouve à l'intersection du sommet du gnomon d'Alexandrie et de la droite tirée de l'extrémité de son ombre jusqu'au soleil, à son point de contact avec le gnomon. Et sur cet angle s'appuie l'arc de cercle qui fait le tour de la pointe de l'ombre du gnomon jusqu'à sa base tandis que celui qui est proche du centre de la terre s'appuie l'arc qui va de Syène à Alexandrie. Ces arcs de cercle sont donc semblables l'un à l'autre en s'appuyant sur des côtés égaux. Le rapport qu'a l'arc du cadran avec son propre cercle, l'arc qui va de Syène à Alexandrie a ce rapport aussi.

Mais on trouve que l'arc du cadran est la cinquantième partie de son propre cercle. Il faut donc nécessairement que la distance qui va de Syène à Alexandrie soit la cinquantième partie du plus grand cercle de la Terre. Et elle est de 5000 stades. Le cercle dans sa totalité fait donc 250 000 stades. Voilà la méthode d'Eratosthène.

Cléomède, *De Motu circulari corporum caelestium*, dans la traduction de R. Goulet (1980)

Annexe 3 : Grille de lecture conçue pour étudier 15 séquences d'enseignement fondées sur des éléments historiques.

Questions	Type de réponse
Quel est le thème de la séance ?	<i>Domaine de la physique ou de la chimie dans lequel s'inscrit la séance s'inscrit. Connaissances scientifiques directement liées à la séance</i>
Quels sont les supports historiques utilisés ?	<i>Documents iconographiques, extraits de sources primaires (de première main), textes décrivant une expérience, biographie, réécriture.</i>
Les éléments historiques sont-ils explicites pour les élèves ?	<i>Les élèves ont explicitement accès aux éléments historiques. Les éléments historiques sont invisibles pour les élèves mais sous-jacents à la construction de la séance.</i>
Quel est le but visé par l'intervention historique dans la séance ?	<i>L'intervention historique vise à permettre aux élèves d'approcher certains éléments relatifs à la nature de la science (rôle de l'erreur, place de la controverse, rôle de l'expérience, variété des démarches scientifiques). L'intervention historique vise à fournir aux élèves des éléments favorisant l'appropriation de concepts scientifiques.</i>
Quel est le mode d'intervention de l'histoire des sciences au cours de la séance ?	<i>Présenter / décrire / illustrer une expérience Favoriser l'installation d'un débat au sein de la classe Décrire une situation-problème / Exposer un problème un résoudre Favoriser / influencer un parcours cognitif Apporter des éléments relatifs à la dynamique de la découverte scientifique (modèles, expériences...) Présenter des éléments conceptuels nouveaux</i>
Le choix des éléments extraits hors de la niche historique sont-ils explicites ?	<i>Oui / Non</i>
Les choix de réorganisation au sein de la sphère scolaire sont-ils explicites ?	<i>Oui / Non</i>
Quels sont les effets sur l'apprentissage des élèves	<i>Motivation Apport conceptuels Apports culturels Apports liés à la nature de la science</i>

Annexe 4 : Extrait du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée (1632).

Salviati: (...) Si j'ai bien compris votre raisonnement, vous dites : quand le navire est à l'arrêt, la pierre tombe au pied du mât, et quand le navire est en mouvement, elle tombe loin du mât ; donc réciproquement, selon vous, si la pierre tombe au pied du mât, on peut en conclure que le navire est à l'arrêt, et si elle tombe loin du mât, c'est que le navire est en mouvement. Et puisque ce qui se produit sur le navire doit pareillement se produire sur la Terre, alors, si une pierre lâchée du haut d'une tour tombe au pied de la tour, on devrait nécessairement en conclure que le globe terrestre est immobile. Est-ce bien là votre raisonnement ?

Simplicio: C'est cela, vous l'avez résumé avec clarté. (...)

Salviati: Très bien. Mais avez-vous jamais fait l'expérience du navire ?

Simplicio: Je ne l'ai pas faite mais je crois que les savants qui en parlent en ont soigneusement fait l'observation ; de plus, cela est tellement évident qu'il n'y a là aucun doute quant au résultat.

Salviati: Vous admettez donc que des savants aient pu décrire cette expérience sans la réaliser, et vous vous en remettez à leur bonne foi. Et si ça se trouve, ces mêmes savants se sont basés aussi sur les dires de leurs prédécesseurs sans réaliser eux-mêmes cette expérience. En fait, je doute que l'on puisse trouver qui que ce soit qui l'ait faite. Car quiconque la ferait trouverait que l'expérience montre tout le contraire de ce que l'on trouve écrit : en effet, la pierre tombe toujours au même endroit du navire, que celui-ci soit à l'arrêt ou qu'il avance à n'importe quelle vitesse. Et comme le raisonnement vaut autant pour le navire que pour la Terre, si une pierre tombe toujours verticalement au pied d'une tour, on ne peut rien en conclure quant au mouvement ou au repos de la Terre. (...)

Simplicio: La conclusion ultime à laquelle vous faites allusion c'est sans doute que, si son mouvement lui a été imprimé de façon indélébile, la pierre n'abandonnera pas le navire, mais le suivra, pour tomber finalement au même endroit que lorsque le navire est à l'arrêt; et je dis, moi aussi, que c'est ce qui se passerait s'il n'y avait pas d'empêchements extérieurs venant troubler le mouvement de la pierre une fois qu'elle a été libérée ; Or il y a deux empêchements : l'un c'est que le mobile est incapable de fendre l'air par son seul élan, il lui manque l'élan de la force des rames dont il participait en haut du mât quand il faisait partie du navire ; l'autre, c'est le nouveau mouvement : sa chute vers le bas doit bien être un empêchement à l'autre mouvement, vers l'avant.

Perspectives

Perspectives

Depuis mai 2009, le LDAR est engagé dans l'ANR EVEILS³⁸, engagement placé sous notre responsabilité scientifique. Les perspectives que nous décrivons ici s'inscrivent dans la continuité des premiers résultats obtenus par notre équipe depuis le démarrage du projet. Par souci de clarté, nous présenterons dans un premier temps ces résultats afin d'en venir, dans un second temps, aux perspectives de recherche telles qu'elles se dessinent pour les années à venir.

EVEILS se propose de développer les outils théoriques, informatiques et expérimentaux nécessaires à l'exploration sensible de domaines de la réalité physique inaccessibles à l'expérience ordinaire et d'étudier l'impact qu'ils peuvent avoir sur les modes d'appréhension de cette réalité, tant au niveau psycho-cognitif, que scientifique (enrichissement de la représentation et de l'intuition relative aux concepts abordés) et culturel (diffusion des connaissances, démonstration directe). Cette démarche pluridisciplinaire, alliant les sciences physiques, les sciences et technologies de l'information et de la réalité virtuelle, ainsi que les sciences didactiques, réunit des spécialistes d'horizons complémentaires qui se sont associés pour définir avec précision les cadres théoriques et expérimentaux à explorer dans le développement du projet. Pour ses premières applications, les partenaires du projet EVEILS se sont concentrés sur des domaines de la physique largement connus et maîtrisés du point de vue théorique et conceptuel, mais réputés inexplores ou inaccessibles à la perception directe et à l'intuition. Ils concernent la structure de l'espace-temps décrite par la théorie de la relativité d'Einstein, ainsi que les propriétés de la gravitation appréhendées via des mécanismes de perception inédits : visualisation 3D immersive et sensations haptiques.

1. La recherche en didactique dans le projet EVEILS

Ce projet pluridisciplinaire associant physiciens, spécialistes de Réalité Virtuelle et didacticiens de la physique, vise à explorer le potentiel innovant de la Réalité Virtuelle (RV) au moyen d'un démonstrateur immersif en trois dimensions (CAVE, Cave Automatic Virtual Environment) permettant de confronter un étudiant (ou toute personne intéressée) à des phénomènes physiques inaccessibles dans le monde ordinaire³⁹. L'un des objectifs principaux du projet EVEILS consiste à déterminer les modifications cognitives et les

³⁸ L'ANR EVEILS est un projet impliquant les partenaires suivants : Etienne Parizot, Laboratoire Astroparticule et Cosmologie (APC) : WP3, université Paris Diderot, Jean-Marc Vézien, Laboratoire LMSI, CNRS : WP2, Cécile de Hosson, Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR), université Paris Diderot : WP1. Responsable du projet : Etienne Parizot.

³⁹ Espace physique dans lequel un utilisateur libre de se mouvoir est visuellement confronté à des objets virtuels grandeur nature en trois dimensions générés par une plate-forme logicielle complexe. La CAVE utilisée dans le projet EVEILS est localisée au LMSI (UPR 3251 du CNRS, Orsay).

avantages éducatifs procurés par une immersion dans l'environnement virtuel. Cet aspect éducatif confère à EVEILS un caractère tout à fait spécifique parmi les programmes de recherche consacrés aux simulations informatiques dans le domaine de la Réalité Virtuelle (Savage et al., 2007).

La structure relativiste de l'espace-temps ne peut pas être appréhendée directement par la perception humaine (Einstein & Infeld, 1938), c'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer la Réalité Virtuelle au domaine de la relativité restreinte en privilégiant la compréhension des concepts relativistes dont les effets sont rendus perceptibles par la Réalité Virtuelle. L'utilisation de l'environnement virtuel est sous-tendue par le développement de scénarios d'apprentissage dédiés. Pour développer ces scénarios, nous avons adopté le cadre de l'Ingénierie Didactique (Artigue, 1988) qui nécessite une analyse préalable des contraintes cognitives et des difficultés liées à un concept donné. Dans cette perspective nous avons exploré la compréhension qu'ont les étudiants de situations relativistes (enquête didactique).

Objet de la recherche

Le but à moyen terme du projet EVEILS consiste à donner à voir, pour les comprendre, les implications des concepts fondamentaux en jeu dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte. Les objectifs de connaissance visés concernent les concepts fondamentaux de la relativité restreinte que nous estimons nécessaires à sa compréhension : notion d'événement, de référentiel, invariance de la vitesse de propagation de la lumière par changement de référentiel inertiel. En particulier, nous souhaitons que les utilisateurs de la CAVE puissent percevoir les conséquences de l'invariance de la vitesse de propagation de la lumière par changement de référentiel inertiel, notamment le fait que la simultanéité de deux événements, effective dans un référentiel donné, n'a plus de sens dans un autre référentiel inertiel. Il est aussi essentiel d'appréhender le fait que, voir quelque chose signifie recevoir de la lumière dans l'œil et que reconstituer la propagation de la lumière reçue donne des informations permettant de comprendre qu'un solide est un ensemble de points localisés dans l'espace et le temps, autrement dit un solide est un ensemble d'événements. Dès lors que la lumière ne met pas la même durée pour parvenir d'un point d'un solide à l'œil de l'observateur, celui-ci verra un solide déformé.

Afin de mettre à jour les idées, les difficultés et les formes de raisonnements d'étudiants confrontés à des situations relativistes, nous nous sommes appuyés d'une part sur les résultats des travaux de Scherr et de ses collaborateurs (Scherr et al., 2001), résultats que nous avons complétés par une enquête que nous avons conduite au cours des tous premiers mois du projet, entre mai 2009 et janvier 2010. Une partie des résultats de cette enquête sont présentés **[articles 6]** mais le paragraphe suivant les explicite de manière plus complète.

Enquête sur les raisonnements d'étudiants en cinématique relativiste⁴⁰

A partir des résultats obtenus par l'équipe de Scherr (la simultanéité de deux événements est absolue, si un observateur perçoit au même instant des signaux lumineux provenant des

⁴⁰ Travail réalisé en collaboration avec I. Kermen (LDAR, Université d'Artois) et E. Parizot (APC, Université Paris Diderot-Paris 7).

événements, cela signifie que ces événements étaient simultanés. Cette conception est due à une tendance à confondre l'émission d'un signal -la date de l'événement- avec la réception de ce signal par un observateur), nous avons élaboré un questionnaire (annexe 1') visant à répondre aux questions de recherche suivantes :

- QR1 : comment les étudiants comprennent-ils le concept de référentiel ?
- QR2 : comment les étudiants comprennent-ils le concept d'événement ?
- QR3 : comment le raisonnement cinématique classique s'incarne-t-il dans la résolution de questions où le cadre relativiste est pertinent ?

Le questionnaire est structuré autour de neuf items comportant chaque fois une question à choix multiples avec demande de justification. Ils mettent en jeu deux situations différentes. La première, la situation du train, est utilisée dans le premier item (I1), la deuxième, la situation du pont, dans les huit autres items (I2.1 à I2.8). Le questionnaire figure en annexe 1. Toutes les questions posées ne font pas appel à la relativité restreinte. Seules trois d'entre elles (I1, I2.6 et I2.8) nécessitent la mise en œuvre d'un raisonnement relativiste. De plus, pour chaque observateur dans la situation du pont, deux questions différentes sont posées : l'une appelle une réponse sur la réception de signaux, l'autre sur l'émission de signaux. L'intention que nous manifestons en distinguant explicitement les questions sur l'émission d'un signal de celles sur sa réception par un observateur revient à déterminer si les sondés sont des « observateurs intelligents » : comme ils disposent d'informations telles que positions, vitesses par rapport à un référentiel donné, ils devraient être capables de reconstituer l'histoire de la lumière reçue et de remonter jusqu'aux événements « émission ».

L'item I1 met en scène un laser allumé sur le quai d'une gare, qui envoie des impulsions de lumière se déplaçant par rapport au quai à la vitesse de la lumière ($300\,000\text{ km/s}$) dans le sens d'un train relativiste passant devant le quai à la vitesse de $100\,000\text{ km/s}$. On demande la vitesse des photons émis par le laser pour un observateur au repos situé dans le train. La réponse A1 correcte doit mentionner que la vitesse des photons est celle de la lumière indépendante du référentiel d'étude.

Dans les items I2.1, I2.2, I2.3 et I2.4, la situation décrite concerne quatre protagonistes A (Alice), B (Bernard), C (Cécile) et D (Denis) immobiles dans le référentiel du pont, R_p . Alice et Bernard se tiennent immobiles face à face chacun à une extrémité d'un même pont. Leur fille Cécile se tient au milieu du pont. À un instant donné, elle leur fait signe de la prendre en photo au flash (on considère que les temps de réaction d'Alice et Bernard sont identiques). Dans I2.1, on demande si Cécile perçoit la lumière des flashes au même instant alors que dans I2.2, on interroge sur l'instant d'émission des flashes. Dans I2.3, le quatrième protagoniste Denis entre en scène, immobile sur le pont entre Alice et Cécile. On demande s'il perçoit la lumière des flashes au même instant et dans I2.4, si dans son référentiel, les flashes lumineux ont été émis au même instant.

Dans les items I2.5, I2.6, I2.7 et I2.8 la situation décrite introduit deux autres protagonistes en mouvement relativiste par rapport au référentiel du pont. Étienne traverse le pont sur un scooter cosmique à la vitesse constante $v=0,8c$ par rapport au sol. Il se dirige d'Alice vers Bernard et arrive à la hauteur de Cécile à l'instant même où celle-ci reçoit la lumière émise par les deux flashes. Dans I2.5, on demande si Étienne perçoit la lumière des flashes au

même instant alors que dans I2.6, on interroge sur l’instant d’émission des flashes dans le référentiel du scooter cosmique d’Étienne. La dernière protagoniste Fanny traverse le pont sur un deuxième scooter cosmique à la même vitesse et dans le même sens qu’Etienne. Elle arrive à la hauteur de Denis au moment où celui-ci reçoit la lumière du flash produit par Alice. Dans I2.7, on demande si Fanny perçoit la lumière des flashes au même instant alors que dans I2.8, on interroge sur l’instant d’émission des flashes dans le référentiel du scooter cosmique de Fanny.

Pour répondre correctement aux questions des items du questionnaire, il faut mettre en jeu les connaissances figurant dans la colonne 3 du Tableau 3. Les réponses incorrectes des étudiants nous renseigneront, par inférence, sur les idées et les types de raisonnement qu’ils ont à propos du concept mentionné dans la colonne 2 du Tableau 3 et qui est visé par l’item.

Question de recherche	Concept visé	Énoncés auxquels renvoie le concept visé	Item du questionnaire associé
QR1	Référentiel	Pour tous les observateurs d’un référentiel donné, un événement est repéré par les mêmes coordonnées spatio-temporelles (ie : deux événements simultanés pour un observateur de ce référentiel le sont pour tous les observateurs de ce référentiel).	I2.2 I2.4 I2.6 I2.8
QR2	Événement	2 événements repérés par les mêmes coordonnées d’espace-temps sont simultanés. Cette simultanéité ne dépend pas du référentiel.	I2.1 et I2.5 I2.3 et I2.7
		L’émission d’un signal lumineux est un événement distinct de la réception de ce signal par un observateur repéré dans un référentiel donné.	I2.1 et I2.2 I2.3 et I2.4 I2.5 et I2.6 I2.7 et I2.8
QR3	Cinématique relativiste	Lorsqu’un signal lumineux est émis par une source en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un observateur, la vitesse du signal mesurée par l’observateur est identique à celle mesurée dans le référentiel de la source en mouvement (ie : les vitesses ne se composent pas).	I1
		La simultanéité de deux événements dans un référentiel donné n’a pas de sens dans un autre référentiel inertiel.	I2.6 I2.8

Tableau 3 : Explication des liens entre les items du questionnaire, les raisonnements visés et les critères permettant de valider les raisonnements des étudiants interrogés.

La recherche de cohérence entre les réponses aux questions des items I2.2 et I2.4 d’une part, et I2.6 et I2.8 d’autre part, fournit des éléments de réponse à QR1. En effet Alice (A), Bernard (B), Cécile (C) et Denis (D) étant immobiles les uns par rapport aux autres définissent un même référentiel, le référentiel du pont R_p . De ce fait, pour ces quatre observateurs, l’événement « A déclenche son flash » a la même coordonnée temporelle et les mêmes coordonnées spatiales. Il en est de même pour l’événement « B déclenche son flash ». De façon similaire, Étienne (E) et Fanny (F) définissent un même référentiel, celui du scooter R_s , différent de R_p . Ainsi les propositions de réponses pour les coordonnées d’espace-temps des événements devraient être identiques pour E et F. C’est pourquoi nous attendons que les étudiants fournissent des réponses identiques dans I2.2 et I2.4 d’une part, et I2.6 et I2.8 d’autre part. (voir Tableau 3).

Pour répondre à QR2 nous demandons aux étudiants si les deux événements « A déclenche son flash » et « B déclenche son flash » sont perçus en même temps par deux observateurs différents appartenant au même référentiel. La date à laquelle un événement se produit est différente de la date à laquelle il est perçu par n'importe quel observateur. Par conséquent la localisation de l'observateur dans un référentiel donné induit une différence pour l'événement réception d'un signal. Pour une paire d'observateurs les dates d'émission des signaux ont des valeurs inchangées mais les dates de réception sont différentes puisque la durée de propagation est différente. Les événements « émission du flash » sont les mêmes pour tous les observateurs du référentiel par contre les événements « réception du flash » dépendent de l'observateur. Afin de vérifier si les étudiants sont conscients de cet aspect nous avons introduit une paire d'observateurs dans un premier référentiel (C et D) puis une seconde paire d'observateurs dans un deuxième référentiel (E et F). Nous examinons alors la cohérence des réponses aux quatre premiers items puis aux quatre suivants. Nous testons également la compréhension de la notion même d'événement (point de l'espace-temps), en localisant deux observateurs en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre en un même point de l'espace temps qu'un événement « réception d'un flash », nous attendons des réponses identiques dans I2.1 et I2.5 d'une part, et I2.3 et I2.7 d'autre part.

Avec les items I1, I2.6 et I2.8, nous cherchons à analyser l'aptitude des étudiants à identifier la nécessité de changer de cadre d'interprétation et à déterminer jusqu'à quel point les étudiants utilisent le cadre cinématique classique. Ces items mettent en jeu des situations où l'invariance de la vitesse de la lumière (I1) et la relativité de la simultanéité doivent être appliquées (I2.6, I2.8). L'émission de chaque flash constitue deux événements simultanés dans le référentiel du pont, et non simultanés dans le référentiel du scooter qui se déplace à une vitesse relativiste par rapport au référentiel du pont.

Cette recherche a donc été menée de mai 2009 à janvier 2010 en France avec 94 futurs enseignants de physique-chimie appartenant à cinq instituts de formation des maîtres (IUFM). Les personnes interrogées possédaient soit une licence de physique, soit une licence de physique-chimie, soit une licence de chimie. La population comprenait 44 personnes ayant déclaré avoir suivi un cours sur la relativité restreinte durant leurs études, 45 n'ayant pas eu d'enseignement de relativité restreinte et 5 ne se prononçant pas. Par la suite les personnes ayant répondu au questionnaire seront désignées sous le terme « étudiants » sauf si la référence à leur qualité de futur enseignant apporte un éclairage supplémentaire.

Résultats et discussion

Notre travail vient conforter certains résultats antérieurs et en révèle de nouveaux. La mise en évidence de la cohérence des réponses à I2.2 et I2.4 d'une part et à I2.6 et I2.8 d'autre part nous renseigne sur le rapport des étudiants au concept de référentiel. Si les étudiants ont une compréhension approfondie du concept de référentiel, ils devraient faire des choix cohérents pour chacune des paires de questions et donner des justifications pertinentes. 4% des étudiants donnent une justification qui fait appel à l'appartenance des observateurs au même référentiel dans les deux paires de questions. Et seulement 2% parmi eux font un choix correct pour les deux paires de questions. À la lumière de ce résultat il apparaît que les étudiants peinent à mobiliser l'idée que dans un même référentiel un événement est repéré par les mêmes coordonnées d'espace-temps pour tous les observateurs immobiles dans ce référentiel. Selon eux, deux événements peuvent être simultanés pour un observateur, non

simultanés pour un autre même si ces observateurs appartiennent au même référentiel. Ceci est à rapprocher avec le fait que les étudiants déterminent des instants d'émission de signaux par les instants auxquels ces signaux sont reçus (aspect lié à la compréhension du concept d'événement). Ce résultat renvoie aux travaux de l'équipe de Rachel Scherr (Scherr et al., 2001, 2002). La dépendance entre l'instant d'émission et l'instant de réception semble gommer la difficulté associée à la relativité de la simultanéité. En effet certains étudiants pensent que des événements peuvent être simultanés pour un observateur et pas pour un autre, même si les observateurs appartiennent à un même référentiel. Ceci est dû au fait qu'ils associent l'ordre dans lequel ces événements sont perçus à l'ordre dans lequel ils se produisent. L'ordre de perception conditionne l'ordre d'émission, alors que ce devrait être le contraire (avec une mention explicite des distances entre l'observateur et le lieu des événements), comme si la causalité s'exerçait du futur vers le passé. Ainsi, si les étudiants ne distinguent pas l'émission de la perception alors la question de la non-simultanéité n'est pas un problème et les concepts mis en jeu en relativité restreinte sont totalement ignorés. En d'autres termes, la question de la non simultanéité ne se pose pas puisque les étudiants l'associent à l'ordre de perception des signaux et non pas à un changement de cadre conceptuel et ne l'envisagent donc pas comme une conséquence du cadre relativiste. Ceci est un des résultats marquants de notre étude.

Un autre enjeu lié à la compréhension du concept d'événement concerne la réception du signal par deux observateurs différents situés au même point d'espace-temps, mais qui ne sont pas immobiles l'un par rapport à l'autre. Pour cela, nous mettons en perspective la cohérence des réponses à I2.1 et I2.5 (les deux observateurs sont Cécile et Étienne) d'une part et à I2.3 et I2.7 (les deux observateurs sont Denis et Fanny) d'autre part. Nous voyons que 13% des étudiants (12 étudiants) répondent de manière cohérente à I2.1 et I2.5 d'une part et à I2.3 et I2.7 d'autre part. Il apparaît donc que la plupart des étudiants interrogés ne peuvent pas fournir une réponse qui dépende seulement de la position de l'observateur quand sa vitesse est mentionnée. En effet, les étudiants qui répondent correctement à I2.3 et pas à I2.7 (de même correctement à I2.1 et pas à I2.5), semblent prendre en compte la vitesse de Fanny (celle d'Étienne), bien que ce ne soit pas un argument pertinent, comme si le mouvement contaminait l'événement. Ce résultat ne semble pas avoir été mentionné dans les études antérieures sur ce sujet.

Afin de répondre à notre troisième question de recherche, nous nous demandons si les étudiants raisonnent dans le cadre de la cinématique classique pour expliquer des situations relativistes. Nous utilisons deux critères : d'abord nous recherchons si le principe de composition additive des vitesses est mobilisé dans un contexte relativiste (réponse à I1) ; ensuite nous essayons de déterminer dans quelle mesure la simultanéité d'événements est vue comme absolue (réponses à I2.6 et I2.8). 28% des étudiants interrogés écrivent que la vitesse des photons est 200 000km/s lorsqu'ils cochent la case b) dans I1. Parmi eux, 20% donnent une justification sans équivoque en soustrayant la vitesse du train à celle de la lumière et 7% d'entre eux au moins ont suivi un cours sur la relativité restreinte. De notre point de vue ces résultats révèlent une difficulté à considérer une constante comme une grandeur invariante : les étudiants connaissent la valeur numérique de c mais tous ne relient pas cette connaissance à l'invariance de la grandeur vitesse de propagation par changement de référentiel inertiel. Pour envisager le deuxième critère, nous examinons les réponses aux questions I2.6 et I2.8. Si certains étudiants connaissent l'invariance de la vitesse de la lumière, ils ignorent ses implications cinématiques générales, en particulier la relativité de la

simultanéité. 20% des étudiants interrogés cochent la case a) à I2.6 et I2.8 (choix incorrect). Parmi eux sept étudiants fournissent une justification utilisant le cadre cinématique classique (voir tableau 7). Nous pouvons dire que parmi les étudiants qui répondent à ces deux questions (quel que soit leur choix de réponse), 15% (14 étudiants) utilisent un raisonnement cinématique classique (avec ou sans justification). Ce pourcentage est un peu plus élevé que celui des réponses correctes (12%) parmi lesquelles deux seulement sont correctement justifiées. Nous pouvons remarquer que parmi les étudiants (11) qui ont choisi la réponse correcte, six avaient suivi un cours sur la relativité restreinte, et deux parmi eux donnent une justification correcte. Cet aspect suggère que le cadre cinématique classique demeure prédominant même après un enseignement de relativité restreinte.

Conséquences sur l'élaboration des scénarios d'apprentissage

Sans entrer dans le détail des scénarios, encore en construction, nous pouvons toutefois en présenter quelques aspects. Dans la CAVE, un observateur (expérimentateur immergé dans la CAVE) regarde une scène constituée de palets cylindriques en mouvement de translation sans frottement sur un billard et animés d'une vitesse proche de celle de la lumière (Figure 16)⁴¹. L'observateur est libre de se déplacer autour la table de billard.



Figure 16 : Billard relativiste tel qu'il apparaît dans la CAVE (LIMSI, CNRS, Orsay –France)

Dans la situation-prototype « objet mobile », l'observateur est immobile. Il regarde un palet sur une table de billard. Dans un premier temps l'observateur fait face à un palet qui se dirige vers lui, puis rebondit sur la bande du billard, et repart dans le sens opposé (la direction du mouvement est perpendiculaire à la bande). L'observateur est interrogé sur les raisons pour lesquelles le palet n'a pas la même forme (Figure 17) ni la même vitesse à l'aller et au retour. Pour comprendre cette situation il est nécessaire de concevoir les différents points d'un objet comme autant d'événements localisés dans l'espace et dans le temps et comme autant de sources lumineuses. On demande ensuite à l'observateur de trouver un moyen de voir le palet non déformé. Cette situation vise à anticiper la confusion émission-perception dans la mesure où l'observateur dispose des informations nécessaires pour reconstituer l'histoire du trajet suivi par la lumière.

⁴¹ Rappelons que la vitesse de la lumière est faible dans la CAVE.

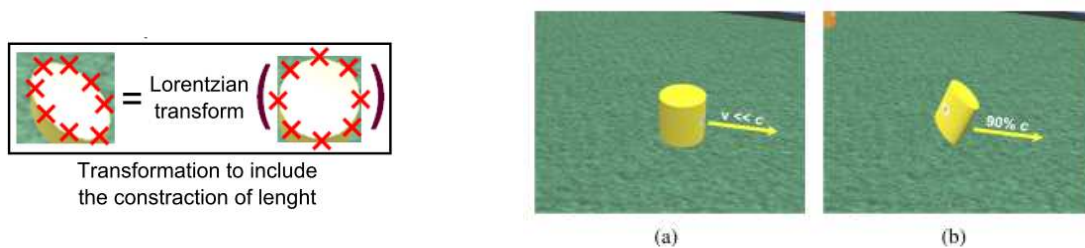


Figure 17 : Vue artificielle d'un palet de billard a) lorsque la vitesse de déplacement du palet est très faible devant la vitesse de la lumière, b) lorsque la vitesse de celui-ci approche la valeur de la vitesse de la lumière.

Dans la situation-prototype « observateurs en mouvement relatif », un observateur immobile lance un palet vers deux palets côte à côte et immobiles, dans une direction perpendiculaire à la bande du billard qui lui fait face. Le palet mobile heurte les palets cibles, ceux-ci se dirigent alors vers la bande du billard opposée à l'observateur et la heurtent en même temps dans le référentiel du billard. L'observateur est interrogé sur la date à laquelle il voit les palets heurter la bande. On rejoue la scène et l'observateur est en mouvement uniforme parallèlement à la bande où ont lieu les chocs. Il est interrogé sur la date à laquelle les chocs ont lieu. Les potentialités de la CAVE et du programme implémenté sont telles que l'observateur s'il le souhaite, peut décider d'immobiliser la scène à l'instant où il le souhaite et alors tourner autour de la scène figée, ou encore rejouer la scène autant de fois qu'il le souhaite.

Ces scénarios seront complétés et testés dans les mois à venir. Il s'agit d'une perspective majeure de ce projet, mais elle n'est pas unique. En effet, l'autre enjeu du projet EVEILS est d'approcher les effets gravitationnels à grande échelle, à la fois par immersion, mais également grâce aux interfaces haptiques permettant de rendre perceptibles au toucher (par retour d'effort) les interactions entre objets ainsi que les positions d'équilibre mécanique créés par des systèmes à deux ou trois corps.

2. EVEILS, la suite : approcher le concept de gravitation

A l'heure actuelle, la partie du projet EVEILS consacrée à l'approche des effets gravitationnels à grande échelle en est à sa phase initiale. La façon dont nous avons choisi de travailler est identique à celle qui a conduit à la création des scénarios dits « relativistes », c'est pourquoi l'enjeu premier consiste à cerner les difficultés et les formes de raisonnement d'étudiants confrontés à des situations engageant une compréhension accrue des mouvements célestes et du concept de gravitation⁴². Un questionnaire didactique est actuellement en préparation qui vise en particulier à caractériser la façon dont les étudiants comprennent :

- l'état d'impesanteur
- la physique en jeu dans les référentiels non-inertiels
- la physique en jeu dans des mouvements de rotation (circulaires, elliptiques)

⁴² Nous restons ici dans le cadre de la mécanique classique.

- la stabilité des positions d'équilibres au sein de systèmes à deux ou trois corps (points de Lagrange)
- l'effet dit de « fronde gravitationnel »

Les résultats de cette nouvelle enquête didactique, associés aux potentialités de la visualisation 3D immersive et des sensations haptiques, devraient nous permettre d'élaborer des scénarios d'apprentissage permettant à un utilisateur d'approcher les conséquences des effets gravitationnels et de comprendre ainsi les notions d'impesanteur, d'équilibre, de référentiel non inertiel ainsi que les raisons qui gouvernent les formes prises par les trajectoires des corps célestes en mouvement. Il s'agit là d'un travail qui se prolongera au-delà de l'ANR elle-même et qui viendra compléter un champ encore peu exploré par les chercheurs en didactique de la physique, celui de la gravitation hors champ terrestre.

Outre les aspects associés à la portée cognitive de l'utilisation d'interfaces 3D immersives et haptiques, la recherche développée dans le cadre d'EVEILS a ouvert de nouvelles voies pour la recherche en didactique de la physique dite « moderne ». En particulier, l'examen des possibles formes prises par les réponses aux items du questionnaire (spécifiquement la forme graphique, voir annexe 2') mise en perspective de l'exploration historique présentée en annexe 3' nous a conduit à nous intéresser au rôle que pouvaient jouer les représentations graphiques (diagrammes espace-temps, diagrammes de Minkowski...) dans la compréhension des concepts en jeu en relativité restreinte.

3. Le rôle des graphiques dans la compréhension des concepts en jeu en cinématique relativiste.

Dans ce contexte, nous avons proposé un sujet de thèse dont l'objet est d'explorer les potentialités didactiques des représentations auprès des élèves mais également des enseignants de physique et de mathématiques⁴³. Nous nous sommes inspirée en cela du rôle joué par Minkowski au début du 20^e siècle dont la démarche mathématique (création des graphiques éponymes visant à structurer l'espace et le temps) semble avoir contribué à la construction même du cadre relativiste (Walter, 1996). Situé à l'interface des mathématiques et de la physique, ce nouvel axe de recherche contribue à renforcer les liens entre les deux didactiques.

Le travail en cours vise l'établissement d'une dialectique entre la notion de graphique (signification, emploi, difficultés) et les lois qui fondent la physique relativiste (invariance de la vitesse de la lumière, non-simultanéité des événements dans deux référentiels différents, notamment). Il s'agit ici d'interroger les passages et les allers-retours entre le monde relativiste et sa représentation sous forme graphique. De manière plus spécifique, nous cherchons à déterminer dans quelle mesure l'utilisation des graphiques constitue une aide pour l'appropriation de lois par essence non-intuitives.

⁴³ Ce nouvel axe de travail est l'objet de la thèse L. Moutet que nous codirigeons avec A. Kuzniak (LDAR). Première inscription : septembre 2010, Université Paris Diderot-Paris 7.

Pour cela, nous avons choisi d'élaborer et de tester l'impact un module d'enseignement organisé autour d'une approche graphique et destiné à des élèves de terminale S⁴⁴. A partir des résultats obtenus, nous proposerons (dans le courant de l'année 2013) une formation d'enseignants de physique et de mathématiques de terminale S dont l'objectif sera la construction d'outils communs d'enseignement dans lesquels seront associés représentations graphiques et concepts cinématiques (dans le cadre classique et relativiste). A travers ce travail nous souhaitons également contribuer aux discussions relatives à la pertinence de l'enseignement de la physique dite « moderne » dans l'enseignement secondaire (Perez & Solbes 2003, Biseci & Michelini, 2008).

Cette formation devrait permettre aux enseignants de disciplines complémentaires de se construire une culture commune à partir de situations usuelles de l'enseignement scientifique, et de profiter des apports des représentations graphiques d'espace-temps pour approcher de manière originale les lois de la cinématique classique et relativiste. Les stagiaires seront mis en situation de résoudre des problèmes de cinématique par la voie graphique (représentation de fonctions d'espace-temps), ou d'exploiter des données graphiques en vue d'établir des lois de correspondance entre différentes grandeurs cinématiques.

Bibliographie

- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique, *Recherche en Didactique des Mathématiques*, 9 (3), 281-308.
- Biseci, E., & Michelini, M. (2008). Comparative teaching strategies in special relativity, GIREP Conference, August 18-22, Nicosia, Cyprus.
- Darrigol, O. (2005). Faut-il réviser l'histoire de la relativité restreinte ? *Bull. Un. Phys.* N°876, 689-697.
- Einstein, A., & Infeld, L. (1938). *Evolution of physics. From early concepts to relativity and quanta*. New York: Touchstone.
- Guesne E. (1984) Children's ideas about light. *New Trends in physics teaching*, vol IV UNESCO, Paris, 179-192.
- Perez, H., & Solbes, J. (2003). Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (1), 135-146.
- Savage, C. M., Searle, A., & McCalman L. (2007). Real Time Relativity: exploration learning of special relativity. *American Journal of Physics*, 75, 791-798.
- Scherr, R., Schaffer, P., & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: simultaneity and references frames. *American Journal of Physics*, 69, 24-35.

⁴⁴ Le projet de programme de physique de la classe de terminale S propose, pour la rentrée 2012, une introduction à la relativité restreinte. Il s'agit pour les élèves d'approcher les notions de « temps propre » et « d'évènement », de savoir que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend ni du mouvement de la source ni de celui de l'observateur et d'explorer une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

- Scherr, R., Schaffer, P., & Vokos, S. (2002) The challenge of changing deeply held student beliefs about relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70, 1238-1248.
- Scherr, R. (2007) Modeling student thinking: An example from special relativity. *American Journal of Physics*, 75, 272-280.
- Walter, S.A. (1996). *Hermann Minkowski et la mathématisation de la relativité restreinte*, thèse de doctorat, Université Paris 7.

Annexe 1' : Questionnaire « Physique relativiste »

I1 : Un train relativiste, un laser

Un laser est allumé sur le quai d'une gare et envoie des impulsions de lumière très intense. Celles-ci se déplacent par rapport au quai à la vitesse de la lumière (300 000 km/s) dans le sens de déplacement d'un train relativiste passant devant cette même gare à la vitesse de 100 000 km/s. Quelle est la vitesse des photons émis par le laser pour un observateur au repos dans le train ?

- a) 300 000 km/s
- b) 200 000 km/s
- c) On ne peut pas répondre
- d) Autre réponse
- e) Je ne sais pas.

Justifier

I2 : Un pont, des scooters cosmiques

1. Il fait nuit. Deux touristes Alice et Bernard se tiennent immobiles face à face chacun à une extrémité d'un même pont. Leur fille Cécile se tient au milieu du pont. A un instant donné, elle leur fait signe de la prendre en photo au flash (on considère que les temps de réaction d'Alice et Bernard sont identiques). Cécile perçoit-elle la lumière des flashes au même instant ?

- a) Oui, elle perçoit la lumière des flashes au même moment
- b) Non, elle perçoit la lumière du flash d'Alice en premier
- c) Non, elle perçoit la lumière du flash de Bernard en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

2. Dans le référentiel de Cécile, les flashes lumineux d'Alice et Bernard ont-ils été émis au même instant ?

- a) Oui, les deux flashes ont été émis au même moment
- b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier
- c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

3. Denis se tient immobile sur le pont entre Alice et Cécile. Denis perçoit-il la lumière des flashes au même instant ?

- a) Oui, il perçoit la lumière des flashes au même moment
- b) Non, il perçoit la lumière du flash d'Alice en premier
- c) Non, il perçoit la lumière du flash de Bernard en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

4. Dans le référentiel de Denis, les flashes lumineux d'Alice et Bernard ont-ils été émis au même instant ?

- a) Oui, les deux flashes ont été émis au même moment
- b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier
- c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

5. Etienne traverse le pont sur un scooter cosmique à la vitesse constante $v=0,8c$ par rapport au sol. Il se dirige d'Alice vers Bernard et arrive à la hauteur de Cécile à l'instant même où celle-ci reçoit la lumière émise par les deux flashes. Etienne perçoit-il la lumière des flashes au même instant ?

- a) Oui, il perçoit la lumière des flashes au même moment
- b) Non, il perçoit la lumière du flash d'Alice en premier
- c) Non, il perçoit la lumière du flash de Bernard en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

6. Dans le référentiel du scooter cosmique d'Etienne, les deux flashes lumineux ont-ils été émis au même instant ?

- a) Oui, les deux flashes lumineux ont été émis au même moment
- b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier
- c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

7. Fanny traverse le pont sur un deuxième scooter cosmique à la même vitesse et dans le même sens qu'Etienne. Elle arrive à la hauteur de Denis au moment où celui-ci reçoit la lumière du flash produit par Alice. Fanny perçoit-elle la lumière des flashes au même instant ?

- a) Oui, elle perçoit la lumière des flashes au même moment
- b) Non, elle perçoit la lumière du flash d'Alice en premier
- c) Non, elle perçoit la lumière du flash de Bernard en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

8. Dans le référentiel du scooter cosmique de Fanny, les deux flashes lumineux ont-ils été émis au même instant ?

- a) Oui, les deux flashes lumineux ont été émis au même instant
- b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier
- c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier
- d) Je ne sais pas

Justifier

Annexe 2' : Diagrammes d'espace-temps permettant de répondre aux Items I2.1 à I2.8 du questionnaire visant à caractériser les difficultés des étudiants en cinématique relativiste.

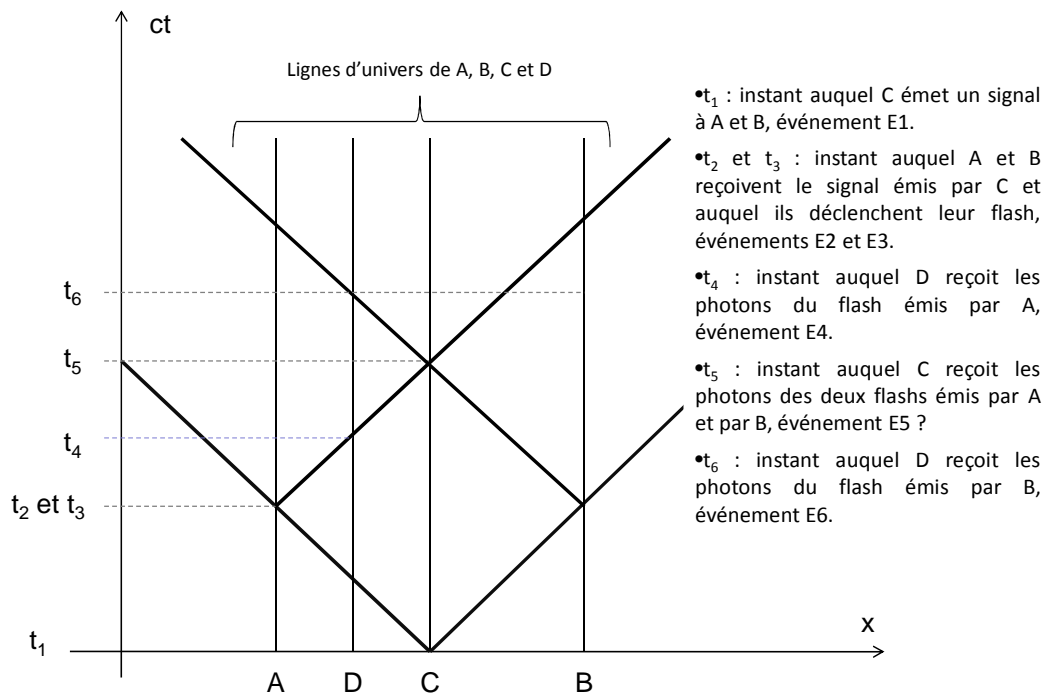


Diagramme d'espace-temps permettant de répondre aux items I2.1, I2.2, I2.3 et I2.4. Les traits épais représentent les lignes d'univers des photons. En choisissant ct à la place de t en ordonnée, et des unités identiques pour chacun des axes, la ligne d'univers d'un photon est figurée comme une ligne droite inclinée de 45° par rapport à l'axe des abscisses. Dans ce diagramme, l'instant de chaque événement est donné dans le référentiel du pont.

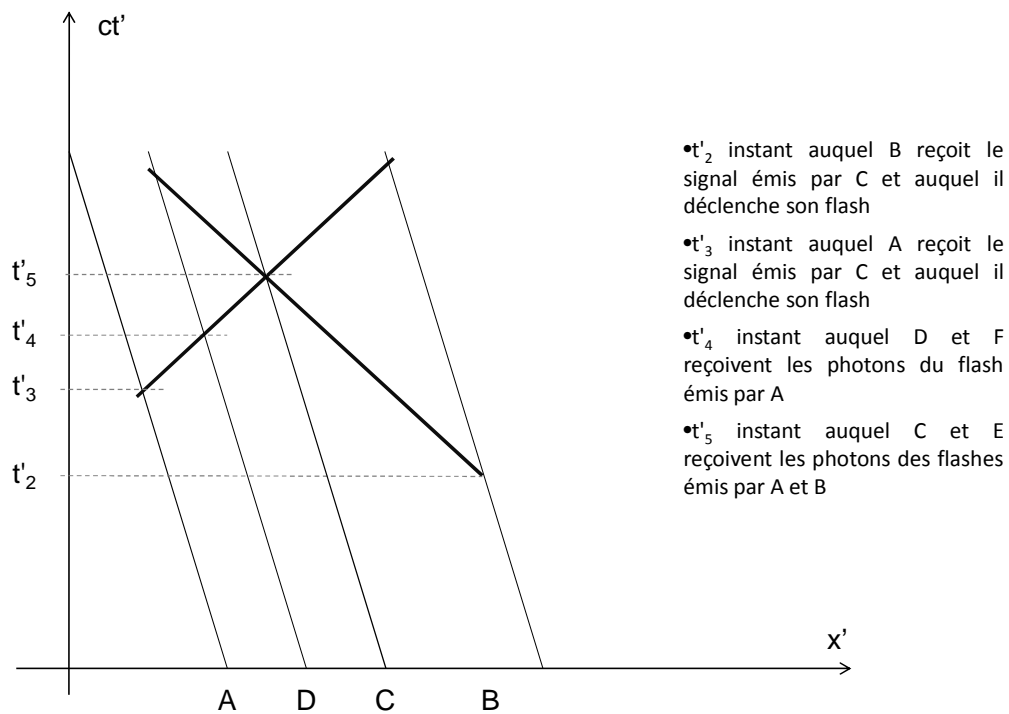


Diagramme d'espace-temps représentant la série des événements E1, E2, E3, E4 et E5 et permettant de répondre aux items I2.5, I2.6, I2.7 et I2.8. Les traits épais représentent les lignes d'univers des photons, les lignes fines représentent les lignes d'univers de A, B, C et D dans le référentiel de E et F.

Calcul de la pente des lignes d'univers des protagonistes, $x' = vt'$, $v = -0,8c$ avec v' , vitesse d'un observateur dans le référentiel du scooter donc $ct' = cx'/v'$ soit $ct' = -x'/b$ avec $b = -0,8$ donc la pente vaut $-1/b$

Annexe 3' : Eléments historiques ayant contribué à l'émergence de la théorie de la relativité restreinte.

L'un des apports majeurs de la science du 17^e siècle est sans aucun doute la négation d'une description absolue et immuable du mouvement des corps telle qu'on la trouve dans les écrits aristotéliens. Chez Galilée, l'état de mouvement (ou de repos) d'un corps prend un caractère relatif et s'entend relativement à un système donné ; il n'a donc plus de sens dans l'absolu. En outre, dans le cas de deux systèmes S1 et S2 en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre (un navire voguant en ligne droite à vitesse constante sur une mer tranquille), la description du mouvement d'un objet (une pierre lâchée du haut du mat du navire, par exemple) dans S1 ne permet pas de se prononcer sur l'état de repos ou de mouvement de ce système considéré par rapport à S2. C'est ainsi que Galilée exprime ce qui sera appelé plus tard la relativité galiléenne, qui rend compte de l'idée qu'il n'existe pas de système privilégié pour l'étude des mouvements. Lorsque Newton énonce quelques années plus tard les lois de la dynamique (mécanique) des corps en mouvement, il précise que celles-ci s'expriment de manière identique quels que soient les systèmes choisis pour étudier ces corps, à condition que les systèmes soient en mouvement rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. Nous disons aujourd'hui que les lois de Newton sont invariantes par changement de référentiel inertiel. Dans le contexte de cette mécanique dite « classique », le temps s'écoule de façon identique dans tous les systèmes considérés, en revanche, la vitesse et la position du corps dépendent du système choisi comme référence pour l'étude du mouvement ; elles peuvent être déterminées par un groupe de transformations dites de « Galilée ».

L'exploration des phénomènes lumineux menée à cette même époque va conduire les savants convaincus du caractère ondulatoire de la lumière à poser l'hypothèse d'un milieu de propagation pour les ondes lumineuses, par analogie avec ce que l'on sait à propos de la propagation du son. Pour Huygens il s'agit d'un milieu subtil, l'éther, qui contient la Terre et dans lequel la Terre se meut. Cet éther devient le support du champ électromagnétique créé par les corps électriques et magnétiques et dont l'évolution dans le temps est gouvernée par les équations établies par Maxwell au milieu du 19^e siècle.

L'existence de l'éther, la cinématique Galiléenne et la dynamique Newtonienne forment l'un des aspects du contexte conceptuel de la physique de la fin du 19^e siècle. À cette époque, de nombreuses expériences mettant en jeu la mesure de la vitesse sont réalisées dont certaines vont révéler un résultat pour le moins surprenant : la vitesse de propagation d'un signal lumineux mesurée par rapport à l'éther ne dépend pas de la vitesse du récepteur de ce signal considéré par rapport à ce même éther (expériences de Michelson et Morley réalisées entre 1881 et 1887). Ce constat contredit les conséquences prévisibles des transformations de Galilée et va nécessiter, au début du 20^e siècle la construction d'un nouveau cadre interprétatif dont Lorentz, Poincaré et Einstein vont être les principaux artisans. Lorentz parvient à concilier l'observation, la cinématique galiléenne et l'existence de l'éther en émettant l'idée suivante : la longueur des instruments de mesure permettant de détecter le signal lumineux se contracte dans le sens opposé au mouvement de la Terre par rapport à l'éther d'un facteur $(1-v^2/c^2)^{1/2}$ (v , vitesse de la Terre dans l'éther, c , vitesse de la lumière par rapport à l'éther). L'éther devient un référentiel absolu par rapport auquel il est possible de rapporter un temps « vrai », la transformation de Galilée est « corrigée » d'un facteur $(1-v^2/c^2)^{1/2}$ et prend le nom de transformation de Lorentz-Poincaré. La théorie pourrait être

acceptable si l'on exceptait la question du phénomène d'induction. Selon la théorie de Lorentz-Poincaré, un même phénomène (le mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine) ne conduit pas à la même explication selon que l'on considère le mouvement de l'aimant ou celui de la bobine par rapport à l'éther. Or, ceci contredit « *le principe épistémologique d'univocité des représentations théoriques* » (Darrigol, 2005, p. 692) selon lequel à un phénomène correspond une seule explication théorique. Einstein résout cette difficulté en rejetant l'éther en tant qu'espace de propagation et en tant que référentiel absolu et énonce l'idée que la vitesse de la lumière est invariante par changement de référentiel inertiel. Il en déduit qu'il n'existe pas de temps absolu, mais que celui-ci, tout comme la position, dépend du référentiel d'étude. Selon lui, la transformation de Lorentz-Poincaré rend compte des changements de position et de temps d'un corps en mouvement lorsqu'il est étudié dans un référentiel inertiel puis dans un autre. Il unifie la dynamique mécanique et la dynamique des champs en montrant que les équations de Maxwell sont également invariantes par changement de référentiel inertiel selon la transformation de Lorentz-Poincaré et énonce ainsi le principe de la relativité restreinte : « *toutes les lois de la nature sont les mêmes dans tous les systèmes de coordonnées qui se meuvent uniformément l'un par rapport à l'autre* » (Einstein & Infeld, 1938, p. 167). La vitesse de la lumière devient, chez Minkowski notamment, la constante structurelle qui unifie l'espace et le temps dans un espace quadridimensionnel. Un événement est défini non seulement dans l'espace mais