



HAL
open science

Épistémologie et didactique de la physique

Manuel Bächtold

► **To cite this version:**

Manuel Bächtold. Épistémologie et didactique de la physique : Des interrelations multiples et fécondes. Education. Université de Montpellier, 2018. tel-02429529

HAL Id: tel-02429529

<https://theses.hal.science/tel-02429529>

Submitted on 7 Jan 2020

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.



Université de Montpellier

Ecole doctorale Information, Structures et Systèmes (I2S)

Spécialité physique (didactique de la physique)

Note de synthèse en vue de l'obtention de
l'habilitation à diriger des recherches

Épistémologie et didactique de la physique

Des interrelations multiples et fécondes

Manuel Bächtold

LIRDEF

Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique,

Education et Formation (EA 3749, UM et UPVM)

Équipe ERES

Jury de soutenance :

Anouk Barberousse (Sorbonne Université), rapporteur

Jean-Marie Boilevin (Université de Bretagne Occidentale), assesseur

Bernard Calmettes (Université de Toulouse Jean Jaurès), assesseur

Cécile de Hosson (Université Paris Diderot), rapporteur

Marilar Jimenez-Aleixandre (Université de Santiago de Compostela), rapporteur

Jean-Marc Lange (Université de Montpellier), assesseur

Soutenue le 3 octobre 2018

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Physique et philosophie pragmatiste.....	6
2.1 Formation et premiers travaux de recherche : entre physique et philosophie.....	6
2.2 La mécanique quantique comme terrain de confrontation entre diverses épistémologies	6
2.3 Vers une interprétation pragmatiste de la mécanique quantique	9
2.4 Y a-t-il des moyens de connaissance universels en physique ?	16
2.5 La coupure classique/quantique à la lumière de la contribution de Bohr.....	17
2.6 Quels sont le statut et la fonction du concept d'espace ?	21
2.7 Quels sont le statut et la fonction du concept d'atome ?.....	24
2.8 Pragmatisme, QBism et la question de l'intersubjectivité	30
3. Histoire, épistémologie et enseignement du concept d'énergie.....	36
3.1 Programme de recherche sur l'enseignement de l'énergie.....	36
3.2 L'enseignement de l'énergie : enjeux éducatifs et stratégies didactiques	37
3.3 Eclairages historiques et épistémologiques sur le concept d'énergie	42
3.4 Programmes, manuels et pratiques : quelle progression d'enseignement ?	53
3.5 L'enseignement de l'équation $E_0=mc^2$ au lycée	62
3.6 Hypothèses sur l'apprentissage de l'énergie	65
3.7 Une stratégie d'enseignement de l'énergie basée sur l'histoire des sciences et l'épistémologie.....	67
3.8 Bilan et perspectives sur l'enseignement de l'énergie	77
4. Démarches scientifiques et démarches d'investigation à l'école	81
4.1 L'enseignement par démarches d'investigation : la question des sources théoriques	81
4.2 La prise en compte des conceptions initiales.....	84
4.3 Contributions effectives et possibles de l'épistémologie	90
4.4 Deux manières de concevoir l'enseignement par démarches d'investigation	96
4.5 La vision des sciences à l'école : enjeux éducatifs et stratégies didactiques.....	98
4.6 Le projet FORMSCIENCES	102
4.7 Comment évaluer la vision des sciences des enseignants ?	104
4.8 Projet de recherche sur les liens entre vision des sciences et pratiques d'enseignement.....	118
5. Argumenter sur des questions socio-scientifiques	121
5.1 Le contexte du projet AREN	121
5.2 Enjeux éducatifs liés à l'argumentation et aux questions socio-scientifiques.....	122
5.3 Comment développer l'argumentation sur des QSS ?	127
5.4 Le numérique : un nouveau champ de possible	129
5.5 Projet de recherche sur l'impact d'un dispositif didactique innovant.....	132
5.6 Projet de recherche sur le rôle de l'épistémologie personnelle et de la métacognition.....	145
5.7 Perspectives dans le cadre du projet AREN	150
6. Conclusion	152
7. Références bibliographiques.....	157

Note : pour la diffusion de cette note de synthèse, la partie CV et les annexes ont été retirées

1. Introduction

« Toute didactique, en ce qu'elle concerne la transmission de connaissances liées à certains savoirs, repose sur des hypothèses quant à la nature, la structure, voire l'histoire de ces savoirs, c'est-à-dire une épistémologie » (Johsua & Dupin, 2003, p. 11). Ainsi débute un ouvrage de synthèse dans le domaine de la didactique des sciences. Nombreux sont les chercheurs dans ce domaine qui partagent l'idée selon laquelle l'épistémologie, mais aussi l'histoire des sciences (ces deux domaines étant étroitement liés), constituent une source théorique majeure alimentant les recherches en didactique des sciences. Cette idée se trouve au cœur de mes propres travaux de recherche. Issu du domaine de l'épistémologie, j'ai débuté mes recherches en didactique des sciences en cherchant à m'appuyer sur les éclairages de l'épistémologie et de l'histoire des sciences concernant les questions d'enseignement et d'apprentissage des connaissances scientifiques. Par la suite, les divers projets de recherche dans lesquels je me suis impliqué depuis mon rattachement au LIRDEF à l'Université de Montpellier en 2009, m'ont permis de percevoir plusieurs apports possibles de l'épistémologie et de l'histoire des sciences pour la didactique des sciences : notamment, pour développer des stratégies d'enseignement liées à des *connaissances scientifiques spécifiques* ou pour repenser de façon plus générale les *méthodes d'enseignement* des sciences.

La question de ces multiples apports va constituer le fil directeur de cette note de synthèse. Je chercherai à les préciser et à les discuter, en m'appuyant sur les recherches auxquelles j'ai participé ou participe actuellement. Ces diverses recherches étant relativement autonomes, je m'efforcerai de mettre en évidence les enjeux, les résultats et les perspectives qui leurs sont propres, mais également à mettre en évidence certaines relations entre elles.

La partie 2 portera sur les travaux de recherche que j'ai menés durant mon doctorat et durant ma période post-doctorale (2000-2009). Je présenterai d'abord ma thèse sur l'interprétation de la mécanique quantique (sections 2.2 et 2.3) à l'occasion de laquelle j'ai développé une démarche épistémologique basée sur la philosophie pragmatiste. Celle-ci se distingue du réalisme scientifique dans la mesure où elle met en suspend toute tentative de mise en correspondance de la théorie étudiée avec le monde extérieur. Elle se focalise sur la pratique des scientifiques. Celle-ci constitue le contexte dans lequel les différents éléments de la théorie révèlent leur utilité. Interpréter une théorie revient alors à mettre en lumière les fonctions pragmatiques que ses différents éléments, associés les uns aux autres, permettent de remplir. Cette démarche pragmatiste a ensuite orienté les études épistémologiques que j'ai réalisées durant mon post-doctorat sur différents points touchant aux fondements de la physique (section 2.4) :

- Sur la coupure classique/quantique, qui concentre les difficultés persistantes associées au problème de la mesure et qui permet d'interroger le statut des résultats de mesure en physique (section 2.5) ;
- Sur le concept d'espace, identifié par Kant comme une forme *a priori* de la connaissance et dont le statut a été rediscuté à la lumière des développements en géométrie puis des théories de la relativité restreinte et générale (section 2.6) ;
- Sur le concept d'atome, élément fondamental de la physique et de la chimie qui a fait l'objet d'affrontements répétés entre les approches réalistes et anti-réalistes (section 2.7).

Pour clôturer cette partie, j'aborderai la question de l'intersubjectivité à partir d'une comparaison entre l'interprétation pragmatiste de la mécanique quantique que j'ai développée et le QBism qui correspond à une interprétation défendue depuis quelques années et revendiquant sa filiation avec la philosophie pragmatiste (section 2.8).

Les trois parties suivantes seront consacrées aux recherches que j'ai menées à l'interface entre épistémologie et didactique de la physique, depuis mon recrutement comme maître de conférences à l'Université de Montpellier (2009). Dans la partie 3, je présenterai mes recherches sur l'histoire, l'épistémologie et l'enseignement de l'énergie. Ces recherches reposent sur une stratégie consistant à repenser les questions d'enseignement et d'apprentissage de l'énergie à la lumière des apports de l'histoire et de l'épistémologie de ce concept. Ces recherches ont été menées en plusieurs étapes :

- *Etape 1* : étude de la littérature en didactique des sciences relative au concept d'énergie visant à identifier les enjeux éducatifs, les difficultés d'apprentissage des élèves et les stratégies didactiques proposées pour son enseignement de l'école primaire jusqu'au lycée (section 3.2) ;
- *Etape 2* : étude en épistémologie et en histoire des sciences visant à comprendre les raisons de l'introduction du concept d'énergie dans la physique du milieu du XIXe siècle, à cerner sa signification et les fonctions qu'il permet de remplir (section 3.3) ;
- *Etape 3* : analyse des programmes, des manuels et des pratiques (en France), à partir d'une grille élaborée sur la base des deux études précédentes (étapes 1 et 2), visant à nourrir la réflexion sur la question de la progression de l'enseignement de l'énergie tout au long de la scolarité (section 3.4) ;
- *Etape 4* : recherche collaborative et itérative pour concevoir et expérimenter une nouvelle stratégie d'enseignement de l'énergie au lycée s'appuyant sur les travaux d'épistémologie et de didactique des étapes précédentes et un introduisant des éléments d'histoire des sciences (section 3.5).

La partie 4 portera sur les liens entre les démarches scientifiques, qui sont mises en œuvre dans les laboratoires par les scientifiques, et les dites « démarches d'investigation », qui sont mises en œuvre dans les classes par les élèves guidés par les enseignants. Je présenterai d'abord mes recherches sur les fondements théoriques de l'enseignement des sciences basé sur des démarches d'investigation, qui avaient pour objectif à la fois de démêler les influences complexes des domaines de l'épistémologie et de la psychologie du développement cognitif et de clarifier les hypothèses du « constructivisme » ou plutôt des « constructivismes », qui forment un courant plus large dans lequel s'inscrit cette approche de l'enseignement (sections 4.1 à 4.4). Je me pencherai ensuite plus spécifiquement sur les liens entre ce que l'on peut appeler « la vision des sciences » (ou « nature of science » suivant l'expression consacrée dans la littérature) et les démarches d'investigation et distinguerai, d'une part, la vision des sciences des élèves que l'enseignement par démarches d'investigation a pour objectif de développer, et d'autre part, la vision des sciences des enseignants qui peut avoir des liens complexes et dialectiques avec la manière dont ils mettent en œuvre leur enseignement par démarches d'investigation (section 4.5). Je présenterai alors l'approche que notre équipe de recherche au LIRDEF a développée dans le cadre du projet FORMSCIENCES (ANR, 2014-2018) pour évaluer la vision des sciences des enseignants (section 4.6 et 4.7). Enfin, il sera question du projet de recherche amorcé dans la continuité de FORMSCIENCES pour étudier plus précisément, de façon qualitative, les liens

entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques d'enseignement des sciences (section 4.8).

Dans la partie 5, je présenterai une recherche amorcée en 2016 ayant pour objet l'argumentation sur des questions socio-scientifiques (QSS). Celle-ci s'inscrit dans le cadre du projet AREN (e-FRAN, 2016-2020) qui vise à développer et évaluer une plateforme numérique de débat (section 5.1). J'en décrirai d'abord le cadre général : d'une part, en précisant les enjeux éducatifs liés à l'argumentation et aux QSS (section 5.2) et, d'autre part, en indiquant les apports des outils numériques du débat mis en avant dans des recherches antérieures (section 5.3). Je présenterai ensuite deux projets de recherche qui s'inscrivent dans ce cadre. Le premier vise à développer un dispositif didactique innovant centré sur un débat numérique au lycée et à en étudier l'impact en termes d'apprentissage de l'argumentation sur des QSS (section 5.5). Le second a pour objectif de mieux comprendre les processus d'apprentissage de l'argumentation au niveau du lycée, en se focalisant sur les liens entre, d'un côté, l'activité de production et d'évaluation de l'argumentation par les élèves et, de l'autre, leur épistémologie personnelle et leur activité métacognitive dans ce contexte (section 5.6).

Dans la conclusion, je reviendrai sur les liens multiples entre épistémologie et histoire des sciences, d'un côté, et didactique de la physique, de l'autre. En m'appuyant sur les différentes recherches présentées, je chercherai à distinguer les différentes contributions possibles de l'épistémologie et de l'histoire des sciences pour la didactique de la physique. Enfin, je soulèverai la question de savoir si, en retour, la didactique de la physique n'apporte pas elle-aussi de nouveaux éclairages à l'épistémologie et à l'histoire des sciences.

2. Physique et philosophie pragmatiste

2.1 Formation et premiers travaux de recherche : entre physique et philosophie

De 1994 à 2001, j'ai bénéficié d'une double formation : en physique (ingénieur physicien de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) et en philosophie (auditeur libre à l'Université de Lausanne, puis Licence et DEA de philosophie de l'Université Paris 1). Durant ma dernière année à l'EPFL, en 1998-1999, j'ai mené une recherche expérimentale sur des structures à boîtes quantiques dans l'équipe d'Eli Kapon, débouchant sur une première publication (dans *Physica E*) comme co-auteur. Durant cette même année, j'ai effectué une étude sur l'interprétation de la mécanique quantique dans une perspective philosophique me permettant de faire converger mes deux centres d'intérêt. Ce mémoire a reçu le prix STS (Sciences, Techniques et Société) de l'EPFL, ce qui m'a convaincu de poursuivre mes investigations sur ce sujet et de m'orienter vers une formation plus spécialisée en histoire et philosophie des sciences. Je me suis alors rapproché de Michel Bitbol, qui a accepté de diriger mon mémoire de DEA à l'Université Paris 1 sur l'empirisme constructif et l'interprétation modale de la mécanique quantique de van Fraassen.

De 2000 à 2009, dans le cadre d'un doctorat et d'un post-doctorat, j'ai réalisé des recherches dans le champ de l'épistémologie de la physique en m'appuyant sur cette double formation. J'ai eu l'occasion de travailler au sein de différents laboratoires dans plusieurs pays. Plus précisément, de 2000 à 2005, j'ai mené mon doctorat (avec une allocation de recherche) au sein de l'IHPST (Paris 1, ENS, CNRS) et du CREA (École Polytechnique, CNRS, laboratoire aujourd'hui dissout), sous la direction de Michel Bitbol, et une année au centre de philosophie de la physique de l'Université d'Oxford (avec une bourse Lavoisier), dans l'équipe de Simon Saunders. De 2006 à 2008, j'ai effectué un post-doctorat de deux années à l'Université de Dortmund (avec une bourse européenne Marie-Curie) dans l'équipe de Brigitte Falkenburg. Durant cette période et jusqu'à 2009, j'ai également assuré des charges d'enseignement en histoire et philosophie des sciences et en mécanique quantique dans deux écoles d'ingénieur en France (CESI et EBI), puis en parallèle à l'Université de Dortmund (comme chargé d'enseignement et de recherche).

Mes travaux de recherche doctoraux et post-doctoraux ont porté sur l'interprétation de la mécanique quantique, la coupure classique/quantique, mais aussi sur le modèle atomiste et le statut de l'espace. Je vais présenter ces différents travaux dans les sections suivantes en commençant par mes recherches sur l'interprétation de la mécanique quantique. C'est à l'occasion de ces recherches que j'ai développé une approche épistémologique basée sur la philosophie pragmatiste, laquelle a guidé ma démarche dans la réalisation des études épistémologiques qui ont suivies.

2.2 La mécanique quantique comme terrain de confrontation entre diverses épistémologies

La mécanique quantique, qui fut élaborée dans les années 1920 et qui est aujourd'hui appliquée dans la plupart des domaines de recherche en physique (que ce soit à l'échelle subatomique, atomique, nanoscopique ou macroscopique), se distingue dans l'histoire des sciences comme l'une des théories les mieux corroborées par l'expérience. Pour autant, la question de son interprétation ne cesse de susciter la perplexité des physiciens, au point de faire aujourd'hui encore l'objet d'un très vif débat parmi les spécialistes de cette théorie.

Deux motivations différentes peuvent conduire à s'intéresser à l'interprétation de la mécanique. La première, qui apparaît la plus évidente et qui anime principalement les physiciens, est de chercher à mieux comprendre cette théorie physique fondamentale. La

seconde, moins connue des non spécialistes et qui anime davantage les philosophes des sciences, est d'explorer sous un jour nouveau des questions épistémologiques classiques sur la construction et le statut des connaissances scientifiques. Bien que l'on puisse distinguer ces deux motivations, les deux types d'investigations qui leurs sont associées se recoupent en partie. En effet, les diverses tentatives d'interprétation de la théorie sont autant d'expressions d'épistémologies concurrentes : réalisme scientifique, instrumentalisme, néo-kantianisme... L'interprétation de la mécanique quantique cristallise ainsi des épistémologies concurrentes. Elle permet également de les mettre à l'épreuve : elle remet en cause certaines épistémologies, tandis qu'elle en rend d'autres plus crédibles.

La première étape de la recherche menée durant mon doctorat a consisté à examiner de manière approfondie la possibilité d'interpréter la théorie conformément aux présupposés du réalisme scientifique (Bächtold, 2009). Suivant cette épistémologie, la science est animée par la recherche de la vérité : lorsque les scientifiques « acceptent » une théorie, c'est qu'ils croient que celle-ci est vraie (ou du moins, se rapproche de la vérité), c'est-à-dire qu'elle représente adéquatement le monde tel qu'il est en lui-même (suivant la caractérisation célèbre du réalisme scientifique par l'un de ses opposants, van Fraassen, 1980, p. 12). Interpréter la mécanique quantique revient alors à « clarifier comment serait le monde » suivant ce qu'en dit cette théorie, pour reprendre une formulation de Healey (1989, p. 6).

La pierre d'achoppement des interprétations réalistes étant le « problème de la mesure », il convenait préalablement de préciser les contours de ce problème. J'indiquerai dans ce qui suit les principaux éléments de cette étude. Pour une présentation détaillée de ce problème au moyen du formalisme mathématique, je renvoie à deux publications (Bächtold, 2008a, 2009). Rappelons que l'élément central du formalisme mathématique de la mécanique quantique est le vecteur d'état (on parle souvent aussi de « fonction d'onde ») associé à un système (ex : un électron). D'après les interprétations réalistes, cet élément formel est censé représenter l'état physique du système étudié. Or, cette hypothèse conduit à admettre qu'un système se trouve en général dans une *superposition* d'états physiques relativement à une observable donnée (c'est-à-dire que cette observable se voit assigner simultanément plusieurs valeurs distinctes), sauf dans le cas particulier où cette observable est mesurée (celle-ci possède alors une valeur bien définie). L'enjeu consiste à expliquer comment s'opère, lors d'une mesure, la réduction d'une superposition d'états physiques à un état physique bien défini. Historiquement, la première explication avancée a été celle du « saut quantique », laquelle fut rapidement écartée en raison des multiples difficultés qu'elle soulève. Les principales difficultés peuvent être résumées ainsi : rien ne justifie qu'une mesure soit le siège d'un processus physique par nature différent et requérant une description en rupture avec l'équation de Schrödinger, qui par ailleurs est supposée être universelle ; il n'est pas possible de préciser exactement quand un saut quantique survient ; l'existence du saut quantique implique la possibilité d'une action non-locale, en contradiction avec la théorie de la relativité restreinte.

Dans un article consacré à l'étude du problème de la mesure et publié dans *Journal of General Philosophy of Science* (Bächtold, 2008a), je cherche à montrer qu'en réalité les spécialistes de la mécanique quantique ne s'accordent pas sur les critères d'une description « satisfaisante » du processus de la mesure et qu'en fonction de ces critères, cinq formulations du problème de la mesure peuvent être distinguées, lesquelles se caractérisent par un ensemble différent de sous-problèmes. Ces formulations diffèrent notamment par le système qui est censé être décrit lors d'une mesure : le système microscopique seul (S), le système microscopique et l'appareil de mesure ($S+M$), ou ces deux systèmes plus

l'environnement ($S+M+E$). Elles divergent également sur la nature de la description à fournir : selon les unes, à la fin d'une mesure, il convient de décrire directement l'état physique du (ou des) système(s) en jeu ; selon les autres, c'est notre connaissance incomplète de cet état physique qui est supposé être décrit. Les principaux sous-problèmes qui sous-tendent le problème de la mesure sont les suivants :

- Justifier que l'on puisse diviser le système total $S+M+E$, qui fait l'objet de la description, en trois sous-systèmes aux limites bien circonscrites correspondant précisément au système microscopique étudié S , à l'appareil de mesure M et à son environnement E (d'Espagnat, 1994) ;
- Déterminer au moyen du formalisme quantique quelle est l'observable que M mesure sur S (il s'agit du problème de la « base préférée » que la théorie de la décohérence permet de résoudre en faisant intervenir l'interaction de M avec E) (Zurek, 1981, p. 1519, Mittelstaedt, 1998, pp. 26 and 81-82) ;
- Expliquer pourquoi l'opérateur densité associé à $S+M$ au terme de la mesure devrait représenter, non plus l'état physique actuel de $S+M$, mais notre connaissance incomplète de celui-ci, c'est-à-dire un mélange statistique propre (il s'agit du problème « et/ou ») (Bell, 1990, p. 36) ;
- Expliquer pourquoi, dans le cadre de la théorie de la décohérence, l'opérateur densité associé à $S+M$ au terme de la mesure ne représente qu'un mélange statistique *impropre* et non un mélange statistique *propre* (d'Espagnat, 1990, 1994, Mittelstaedt, 1998).

Cette étude constitue un préalable à un examen systématique des différentes interprétations réalistes de la mécanique quantique, car elle permet de cerner précisément les problèmes que chacune d'elles vise à résoudre.

Les principales interprétations réalistes que j'ai ainsi examinées (Bächtold, 2009) sont : la théorie de l'onde pilote (Bohm, 1952), la théorie de la localisation spontanée (Ghirardi, Rimini & Weber, 1986), les interprétations modales (Healey, 1998), les interprétations en termes de mondes multiples et celles en termes d'esprits multiples (Barrett, 1999). Par ailleurs, j'ai mené une étude spécifique sur l'interprétation réaliste de Popper en termes de propensités (Popper, 1992) publiée dans un chapitre de l'ouvrage coordonné par Ian Jarvie, Karl Milford et David Miller (Bächtold, 2006). Je ne rentrerai pas ici dans le détail de ces interprétations et me contenterai de donner la conclusion générale de cet examen. Celle-ci revient à dire que toutes les tentatives d'interprétation réaliste de la mécanique visant à éviter le problème de la mesure se heurtent à des difficultés sérieuses ou des contreparties les rendant peu attractives :

- Elles impliquent une modification du formalisme mathématique de la mécanique quantique sans que celle-ci conduise à de nouvelles prédictions pouvant être mises à l'épreuve de l'expérience (ex : ajout d'une seconde équation d'évolution dans la théorie de l'onde pilote, changement de l'équation de Schrödinger dans la théorie de la localisation spontanée) ;
- Et/ou elles soulèvent de nouveaux problèmes d'ordre théorique (ex : contradiction avec la théorie de la relativité restreinte pour la plupart des interprétations réalistes, mises à part celles en termes de mondes multiples) ;
- Et/ou elles offrent une image du monde qui est « extravagante », suivant l'expression de Bell (1987) (ex : l'Univers constitué d'une infinité de mondes parallèles).

De fait, aucune interprétation ne fait aujourd'hui l'objet d'un consensus parmi les partisans d'une approche réaliste. Une manière positive de considérer l'existence d'une pluralité d'interprétations réalistes disponibles consiste à les envisager comme apportant des éclairages complémentaires sur le monde. C'est l'idée avancée par van Fraassen (1991, pp. 481-482) qui est pourtant l'une des figures majeures de l'anti-réalisme. Cependant, ces diverses interprétations réalistes reposent sur des idées mutuellement contradictoires : monde strictement déterministe *versus* monde partiellement indéterministe, monde unique *versus* mondes multiples, ou encore localité *versus* non-localité. Il est difficile dans ces conditions de percevoir en quoi ces interprétations seraient complémentaires et comment elles pourraient nous offrir une image cohérente du monde.

Deux conclusions différentes peuvent être tirées de cet échec des tentatives réalistes pour interpréter la mécanique quantique. La première revient à soutenir que cette théorie est particulièrement difficile à interpréter et provisoirement résiste à une interprétation réaliste qui soit consensuelle. La seconde, plus radicale, consiste à questionner la pertinence même du réalisme scientifique. Si cette approche épistémologique n'est pas opérante pour interpréter une théorie fondamentale de la physique, c'est peut-être que ses présupposés doivent être remis en cause, en particulier, celui selon lequel il existerait une correspondance entre la structure d'une théorie acceptée et la structure du monde physique. En d'autres termes, le cas de la mécanique quantique apporte un nouvel argument contre le réalisme scientifique, qui s'ajoute ainsi aux deux arguments anti-réalistes majeurs : celui de la « sous-détermination de la théorie » par l'expérience, selon lequel les données de l'expérience ne déterminent jamais une unique théorie pouvant en rendre compte, et celui de la « méta-induction pessimiste », selon lequel les multiples remises en causes des théories qui étaient acceptées à une époque de l'histoire des sciences conduisent à penser qu'il peut en aller de même pour les théories acceptées aujourd'hui (pour une présentation et une discussion détaillée de ces arguments, voir Psillos, 1999).

2.3 Vers une interprétation pragmatiste de la mécanique quantique

L'un des principaux défauts qui caractérisent le réalisme scientifique, à mon sens, est de ne pas suffisamment prendre en compte la genèse effective des théories et en particulier le contexte de leur émergence. Cette tendance à occulter la manière dont les théories acceptées ont été construites correspond, d'après Latour et Woolgar (1996 [1979], p. 180) (suivant ainsi James, 2007 [1907], p. 226), à une étape commune du travail des scientifiques. S'il est légitime pour les scientifiques de gommer les tâtonnements, voire les controverses, qui ont précédé la stabilisation d'une connaissance pour pouvoir explorer plus efficacement de nouveaux phénomènes, cela paraît plus problématique pour les épistémologues à qui l'on demande de clarifier le statut des théories. Certes, les réalistes scientifiques évoquent la confrontation des théories successives à l'expérience et discutent ainsi de leur évolution dans l'histoire des sciences, soutenant pour certains (comme Popper, 1973 [1935]) que cette confrontation assure la convergence progressive des théories vers la vérité. Néanmoins, cette histoire des théories sur une grande échelle de temps ne permet pas de comprendre précisément comment les scientifiques en sont venus, dans leurs pratiques, à faire référence à telle entité (ex : l'électron) ou à employer telle structure formelle (ex : les espaces vectoriels). En ne considérant que les théories achevées et déjà acceptées, les partisans du réalisme scientifique sont enclins à réifier les entités et les structures formelles de ces théories et à postuler l'existence d'une correspondance de celles-ci avec le monde physique.

Dans le cas de la mécanique quantique, nous venons de le voir, une telle approche conduit à une impasse.

Durant mon doctorat, partant du cadre de pensée néokantien développé par mon directeur de thèse Michel Bitbol (1996, 1998), je me suis progressivement tourné vers la philosophie pragmatiste de Peirce, James et Dewey, afin d'y puiser les idées constitutives d'une approche originale pour interpréter la mécanique quantique.

Comme l'écrit James (2007, [1907], p. 113), le pragmatisme correspond à une « méthode », celle qui « vise à interpréter chaque notion en fonction de ses conséquences pratiques ». L'hypothèse sous-jacente à cette méthode est que la signification des mots, tout comme la valeur de vérité des propositions sur le monde, ne peuvent être dissociées des actions, ou plus généralement des activités, qui sont associées à l'usage de ces mots et de ces propositions. Adopter une approche pragmatiste revient donc à étudier les mots, les propositions, mais aussi les modèles ou les théories en tournant notre regard vers les activités dans le cadre desquelles ceux-ci sont utilisés.

Ainsi, l'interprétation de la mécanique quantique que j'ai qualifiée de « pragmatiste » consiste, en substance, à suspendre une lecture spontanément ontologique des différents termes (« système microscopique », « observable »...) ou éléments formels de la théorie (vecteur d'état, nombres complexes, équation de Schrödinger...) et à chercher à définir puis à justifier ces éléments comme des moyens de remplir un ensemble de « fonctions pragmatiques », ou autrement dit, comme des moyens permettant aux physiciens de rendre compte et d'anticiper au mieux les résultats de mesure dans leurs activités de recherche en microphysique. Cette interprétation repose sur une manière de considérer la connaissance scientifique qui est en rupture avec le réalisme scientifique. Au lieu d'extraire de la théorie une représentation du monde physique, en effectuant des pas interprétatifs qui nous font sortir du domaine scientifique pour nous diriger vers celui de la métaphysique, la démarche proposée consiste à contextualiser la mécanique quantique dans la pratique où celle-ci est employée. Il n'est plus question, pour chaque entité et élément formel de la théorie, de chercher un correspondant dans le monde extérieur, mais de cerner l'utilité de tel terme ou de tel élément formel dans le cadre des activités de recherche en microphysique.

Reprenant les travaux de ma thèse, j'ai affiné cette démarche pour interpréter la mécanique quantique suivant une approche pragmatiste dans deux publications : un article dans la revue *Foundations of Physics* (Bächtold, 2008b) et un livre chez Hermann (Bächtold, 2009). Cette démarche se compose de trois étapes :

- *Première étape* : donner une *définition pragmatique* à chacun des termes employés par les physiciens en microphysique. Une telle définition vise à dégager la *signification pragmatique* du terme considéré. Par « signification pragmatique », j'entends la signification donnée par l'ensemble des effets pratiques (au sens jamesien de ce qui est concret ou spécifique) pouvant être déduits de ce terme, par tous les membres d'une communauté, lorsque ce terme est employé dans un certain contexte – l'expression « par tous les membres d'une communauté » soulignant le fait que la signification pragmatique est partagée de façon intersubjective, bien que souvent de façon seulement tacite.
- *Deuxième étape* : expliciter les *fonctions pragmatiques* que doit remplir toute théorie pour permettre aux physiciens de mener à bien leur activité de recherche en microphysique.

- *Troisième étape* : établir le fait que seule la mécanique quantique réalise exactement ces fonctions pragmatiques. À cet égard, il convient de montrer (i) que les différentes composantes de la théorie contribuent à remplir ces fonctions, mais aussi (ii) que tout changement de la théorie implique soit que les fonctions pragmatiques ne peuvent pas toutes être remplies, soit que la théorie se charge d'une structure formelle de surplus (au sens de Teller, 1995, p. 25).

Dans la *première étape*, j'ai proposé des définitions pragmatiques pour les termes principaux employés par les physiciens dans le contexte de la description ou de la réalisation d'une expérience en microphysique : « préparation », « mesure », « observable », « système microscopique »... Sans redonner ces définitions de façon précise, j'en indiquerai ici les idées principales : une « préparation » correspond à une collection de séries de manipulations expérimentales, un « système microscopique » à un ensemble de préparations, une « mesure » à une série de manipulations expérimentales produisant un résultat, une « observable » à un ensemble de mesures. À noter que ces définitions ne se veulent ni définitives ni exhaustives. L'objectif est premièrement de montrer la possibilité principielle de formuler de telles définitions et deuxièmement de disposer de termes ayant une signification précise et dépourvue de toute charge ontologique, qui permettent d'exprimer les fonctions pragmatiques lors de la seconde étape.

L'approche pragmatiste proposée se distingue de l'instrumentalisme tel qu'il est par exemple défendu par de Muynck (2002). Il n'est pas question, en effet, d'affirmer que la mécanique quantique ne porte que sur des *objets macroscopiques*, et ce faisant, de prendre à contre-pied le discours usuel des physiciens. L'approche pragmatiste que je défends s'efforce de laisser en l'état le vocabulaire dont font usage les physiciens dans la pratique. Si ces derniers parlent de « systèmes microscopiques », c'est que cette expression possède une certaine utilité pour leur activité de recherche, utilité que l'interprétation pragmatiste cherche à mettre en lumière. En évacuant cette expression du champ lexical de la mécanique quantique, de Muynck risque d'occulter certains aspects essentiels du fonctionnement de la théorie. Cette dernière, affirment couramment les physiciens, a pour objet des *systèmes microscopiques*, et plus précisément, elle permet de faire des prédictions concernant les mesures réalisées sur de tels systèmes. Suivant l'approche pragmatiste, il ne s'agit pas non plus d'affirmer l'antithèse du réalisme scientifique en soutenant que ces systèmes n'existent pas. Est-ce que ces systèmes microscopiques existent ? Selon moi, il convient ici de distinguer deux contextes : celui de la pratique des physiciens et celui des discussions philosophiques des épistémologues. Dans le contexte des activités de recherche en microphysique, l'hypothèse de l'existence de systèmes microscopiques tels que les électrons ou les photons fait sens pragmatiquement parlant : elle conduit les physiciens à mener des actions couronnées de succès. Cependant, le succès de cette hypothèse sur le plan pratique ne légitime pas la postulation de l'existence ontologique de ces entités dans le contexte du débat épistémologique sur cette question. De fait, chercher à constituer une image de ce que sont les électrons ou les photons au-delà de ce que ces systèmes signifient sur le plan pratique s'avère fort problématique. Songeons par exemple aux difficultés soulevées par les représentations corpusculaire et ondulatoire de ces entités.

Lors de la *seconde étape*, j'ai dégagé les fonctions pragmatiques que doit remplir toute théorie pour que celle-ci permette aux physiciens de mener avec succès leurs activités de recherche en microphysique :

- F_1 : Pour toute préparation \mathcal{P} , la théorie doit permettre aux physiciens de caractériser \mathcal{P} de manière synthétique.
- F_2 : Pour toute observable A , la théorie doit permettre aux physiciens de prédire l'ensemble des valeurs numériques qui peuvent être obtenues au terme de la mesure de A .
- F_3 : Pour toute préparation \mathcal{P} et pour toute observable A , la théorie doit permettre aux physiciens de prédire la probabilité de survenue de chaque valeur qui peut être obtenue au terme de la mesure de A à la suite de \mathcal{P} (la relation d'incompatibilité entre certaines observables jouant le rôle d'une contrainte empirique qui impose l'abandon de l'exigence de prédictions déterministes au profit de prédictions seulement probabilistes).
- F_4 : La théorie doit permettre aux physiciens de remplir les fonctions F_1 à F_3 lorsque la préparation considérée met en jeu un système composé de plusieurs sous-systèmes.
- F_5 : La théorie doit permettre aux physiciens de remplir les fonctions F_2 à F_4 lorsqu'il existe, entre la préparation et la mesure, une phase intermédiaire (avec une certaine durée).
- F_6 : Lorsque les physiciens n'ont qu'une connaissance incomplète de la préparation qu'ils effectuent, la théorie doit leur permettre de remplir les fonctions F_1 à F_5 à l'incertitude près qu'introduit cette incomplétude.
- F_7 : La théorie doit permettre aux physiciens d'intégrer la connaissance empirique acquise lors du constat du résultat d'une mesure, afin de pouvoir remplir les fonctions F_1 à F_6 à la suite de cette mesure.

L'objectif de la *troisième étape* est de montrer que la mécanique quantique est l'unique théorie permettant de remplir exactement ces sept fonctions pragmatiques. Pour ce faire, j'ai cherché, premièrement, à mettre clairement en lumière la contribution de chacune des composantes de la mécanique quantique, et cela, en prenant appui sur de nombreux travaux existants, comme ceux de Aaronson (2004), Ballentine (1998), Bitbol (1996), de Muynck (2002), Finkelstein (1996), Hughes (1989), Jordan (1969, 1975) et van Fraassen (1991) :

- Le formalisme des espaces de Hilbert permet d'encapsuler de manière synthétique dans un vecteur l'ensemble des informations associées à une certaine préparation. Il remplit ainsi la fonction pragmatique F_1 .
- Le formalisme des espaces de Hilbert permet de déterminer de manière *a priori*, pour toute mesure pouvant être réalisée à la suite d'une préparation donnée, l'ensemble de ses résultats possibles et la probabilité de leur survenue respective. À ce titre, il remplit également les fonctions pragmatiques F_2 et F_3 . Deux points essentiels sont ici à souligner : premièrement, les changements de base d'un vecteur sur un espace de Hilbert permettent de traduire des symétries physiques associées aux dispositifs expérimentaux (par exemple, les symétries liées au changement d'orientation d'un appareil de Stern-Gerlach) ; deuxièmement, le formalisme des espaces de Hilbert permet l'application d'une version généralisée du théorème de Pythagore, garantissant ainsi que les probabilités associées aux différentes bases orthonormées soient toujours conformes à la théorie classique des probabilités (suivant laquelle la somme des probabilités est égale à 1).

- L'opération du produit tensoriel permet de traiter le cas d'une préparation mettant en jeu un système composé de plusieurs sous-systèmes. Il sert à remplir la fonction pragmatique F_4 .
- L'équation de Schrödinger permet de maintenir au formalisme son pouvoir prédictif dans la situation où il y a une phase intermédiaire, avec une certaine durée, entre la préparation et la mesure. Cette équation remplit la fonction pragmatique F_5 . Un autre point essentiel est ici à mettre en avant : en s'appuyant sur le théorème de Stone, la structure générale de l'équation de Schrödinger peut être dérivée à partir d'un ensemble d'hypothèses très simples (ex : l'homogénéité du temps).
- L'opérateur densité peut servir à rendre compte de situations où les physiciens n'ont qu'une connaissance incomplète de la préparation qu'ils ont réalisée. Il permet donc de remplir la fonction pragmatique F_6 .
- Enfin, l'opération formelle associée au postulat de projection (qu'il convient de distinguer de, et de ne pas interpréter en termes de, la « réduction de l'état physique du système étudié ») permet de traduire le constat du résultat d'une mesure dans le formalisme, afin que celui-ci préserve son pouvoir prédictif relativement aux mesures subséquentes pouvant être réalisées en pratique. Autrement dit, cette opération formelle permet de remplir la fonction pragmatique F_7 .

Deuxièmement, il s'agit d'établir que toute modification du formalisme de la mécanique quantique implique (a) soit que les sept fonctions pragmatiques ne peuvent pas toutes être remplies, (b) soit que le formalisme se charge d'une structure formelle de surplus n'ayant aucune utilité sur le plan pratique. À noter que cette partie de la démarche pragmatiste peut difficilement être accomplie de manière exhaustive et constitue plutôt un programme de travail. Les principaux résultats de mon investigation à ce sujet sont les suivants :

- Le formalisme des espaces vectoriels définis sur les *nombres réels* ne possède pas suffisamment de degrés de liberté pour permettre de faire des prédictions relativement aux observables de spin selon toutes les directions possibles de l'espace physique. Ce résultat permet de justifier de manière pragmatiste la nécessité de recourir aux nombres complexes.
- Si la règle de dérivation des probabilités à partir d'un vecteur défini sur un espace vectoriel complexe correspond au module de ce vecteur élevé à une puissance *différente de deux*, alors celle-ci ne peut pas respecter la théorie classique des probabilités (suivant laquelle la somme des probabilités est égale à 1).
- Faire appel à une seconde équation d'évolution, comme l'équation de guidage de la théorie de l'onde pilote, introduit une structure formelle qui n'a pas d'utilité sur le plan pratique.
- En l'absence de l'opération formelle associée au postulat de projection, ou d'une opération formelle équivalente (telle que la conditionnalisation des probabilités), le formalisme quantique perd son pouvoir prédictif à la suite d'une mesure.

Deux objections importantes m'ont été adressées au cours d'échanges oraux dans le cadre de séminaires ou de colloques.

Premièrement, il a été objecté que ma démarche pouvait apparaître circulaire au sens où je dégageais les fonctions pragmatiques à partir de ma connaissance de la mécanique quantique avant de montrer que cette dernière permettait de remplir précisément ces fonctions. Concrètement, j'ai effectivement dégagé ces fonctions sur la base de ma connaissance de la théorie et non de façon *a priori* ou *ex-nihilo*. Cependant, cette démarche

est selon moi conforme à une approche pragmatiste et son caractère circulaire n'est pas problématique : il s'agit de partir de la pratique des physiciens et de ce qu'ils font effectivement à l'aide de la mécanique quantique, afin d'en proposer une reconstruction qui permette de justifier chacun de ces éléments d'un point de vue pragmatiste en évitant d'invoquer une supposée correspondance avec des éléments du monde extérieur.

Deuxièmement, il a été reproché à plusieurs reprises par des partisans du réalisme scientifique que ma démarche pragmatiste dépouillait la mécanique quantique de tout son caractère original, lequel résiderait dans les étrangetés du monde physique vers lesquelles cette théorie dirigerait notre regard : en particulier, la superposition d'états, l'intrication des états et la non-localité. À cette objection, il est possible de répondre en deux temps. D'une part, accepter en l'état ces idées de superposition d'états, d'intrication des états et de non-localité conduit à des difficultés théoriques majeures : les idées de superposition d'états et d'intrication des états nous ramènent au problème de la mesure dans une version clairement identifiée dans la littérature comme insoluble, tandis que l'idée de non-localité se trouve être en flagrante contradiction avec la théorie de la relativité restreinte. Dès que l'on suspend l'interprétation réaliste du vecteur d'état comme représentant l'état physique du système étudié, aucune de ces trois idées n'émerge et les difficultés associées s'évanouissent. Dans un chapitre de ma thèse et de mon livre (Bächtold, 2009), je tente de montrer, à travers un examen approfondi, que les tentatives de preuve du caractère non-local de la mécanique quantique échouent et que cette théorie est au contraire parfaitement conforme à la localité au sens de la théorie de la relativité restreinte comme l'a souligné de Muynck (1986). D'autre part, un résultat de la démarche pragmatiste, qui m'est apparu rétrospectivement, est de permettre de dégager clairement par la négative la contribution de la réalité empirique dans la construction de la théorie : contribution qui se traduit par la relation d'incompatibilité entre certaines observables. En effet, l'intention première de cette démarche est de chercher à justifier les différents éléments constitutifs de la mécanique quantique à la lumière des fonctions qu'ils permettent de remplir sur le plan pratique. Or, la mise en œuvre de cette démarche, de fait, conduit aussi à identifier ce qui dans la théorie résiste à une telle justification pragmatiste. Si les probabilités, les combinaisons linéaires de plusieurs vecteurs (interprétées par les réalistes en termes de superposition d'états), les nombres complexes, ou encore l'équation de Schrödinger peuvent être expliqués en termes de leur utilité dans les activités de recherche en microphysique, il n'en va pas de même de la relation d'incompatibilité entre certaines observables. Cette relation d'incompatibilité apparaît dans le formalisme de la mécanique quantique comme l'expression d'une *contrainte empirique fondamentale*. Je propose de la qualifier de « fondamentale », car il est possible de la considérer comme étant à l'origine de la nécessité de faire appel à des probabilités et nous conduisant à faire le deuil d'une physique déterministe. Autrement dit, la démarche pragmatiste, loin d'oublier les particularités du monde physique étudié par la microphysique offre une piste pour les circonscrire de façon précise.

Une question importante concernant l'interprétation pragmatiste de la mécanique quantique doit encore être discutée : qu'advient-il du problème de la mesure auquel se heurte les interprétations réalistes ? Une réponse laconique reviendrait à affirmer que ce problème ne se pose plus. Toutefois, une telle réponse peut difficilement convaincre les spécialistes qui se sont penchés sur la description du processus de la mesure, qu'ils soient ou non partisans du réalisme scientifique. J'ai ainsi tenté d'élaborer une réponse plus développée dans le cadre de ma thèse autour des notions de possible et d'actuel, lesquelles

ont constitué le point de départ de mon travail de doctorat. Cette réponse ne permet cependant pas de clarifier tous les aspects du problème de la mesure, ce qui a motivé les études que j'ai ensuite menées sur la coupure classique/quantique (voir la section suivante).

Avant de revenir sur les difficultés qui subsistent (section 2.5), je présente ici dans les grandes lignes la description du processus de la mesure que j'ai élaborée dans ma thèse en termes des notions du possible et de l'actuel. Ma démarche consistait à examiner ce que les physiciens font concrètement lorsqu'ils réalisent une mesure en microphysique. Il est apparu que le passage entre la phase qui précède la réalisation de la mesure et celle qui la suit implique une modification du domaine auquel les physiciens ont accès, et corrélativement, un changement du type d'activité mené par les physiciens. En effet, avant la réalisation de la mesure, les physiciens n'ont accès qu'au *domaine du possible*, c'est-à-dire qu'ils ont affaire à un ensemble de mesures possibles et, relativement à chacune de ces mesures possibles, à un ensemble de résultats possibles. Ils font alors appel au *formalisme mathématique de la mécanique quantique* pour effectuer des prédictions probabilistes concernant les résultats possibles de la mesure qu'ils envisagent de réaliser. En revanche, à la suite de cette mesure, les physiciens ont accès au *domaine de l'actuel*, c'est-à-dire que l'une des mesures possibles a été réalisée en acte et que l'un des résultats possibles de cette mesure est survenu en acte. Leur activité revient alors à observer au moyen de leurs *organes sensoriels* l'événement macroscopique survenu au terme de la mesure (ou la propriété macroscopique de l'appareil de mesure qui en résulte) et à interpréter celui-ci au moyen des *concepts de la mécanique quantique* en termes d'un événement physique, lequel est identifié comme le « résultat de mesure ». Ce n'est que dans la perspective d'éventuelles mesures subséquentes – mesures qui ne sont à nouveau que *possibles* – que les physiciens font appel au formalisme mathématique de la mécanique quantique. Il leur faut dans ce cas appliquer le postulat de projection, c'est-à-dire remplacer le vecteur d'état associé au système microscopique étudié avant la première mesure par un nouveau vecteur d'état qui prenne en compte le résultat survenu en acte lors de cette première mesure, ou procéder à une conditionnalisation des probabilités associées aux résultats de mesure possible (si l'on tient à ne rien perdre du pouvoir prédictif du formalisme quantique). Cet examen de l'activité des physiciens lors d'une mesure permet en quelques sortes de « dissoudre » les différents sous-problèmes composant le problème de la mesure, c'est-à-dire de faire en sorte que ceux-ci ne se posent plus (Bächtold, 2009) :

- Le vecteur d'état associé au système microscopique étudié S n'est pas interprété comme le représentant de son état physique actuel. Sa fonction est de fournir des prédictions probabilistes concernant les résultats possibles des différentes mesures possibles. Il n'y a donc pas lieu d'expliquer comment s'effectue, lors d'une mesure, la réduction (au sens physique) d'une superposition d'états physiques à un état physique actuel bien défini.
- La division du système total $S+M+E$, qui fait l'objet de la description quantique de la mesure, en trois sous-systèmes aux limites bien circonscrites correspondant précisément à S , à l'appareil de mesure M et à l'environnement E peut se justifier, d'un point de vue pratique, par son utilité dans l'activité de recherche en microphysique.
- Connaissant l'observable d'indication sur M et sachant que ses valeurs possibles sont mutuellement exclusives, les physiciens lui associent naturellement une base orthogonale et décrivent le vecteur d'état associé à $S+M$ sur cette base. De ce fait, la base relative à S dans l'expression de ce vecteur d'état (au terme de l'interaction entre

S et M) est elle-même fixée, déterminant ainsi de façon univoque l'observable mesurée sur S . Le problème de la base préférée ne se pose donc pas.

- L'opérateur densité associé à $S+M$ n'est pas interprété comme le représentant de l'état physique actuel de ce système composé. Il ne constitue qu'un outil de prédiction probabiliste concernant les différents résultats pouvant survenir au terme d'une mesure particulière (dans le cas où il s'agit d'un opérateur densité réduit) ou au terme de différentes mesures possibles (dans le cas où cet opérateur densité équivaut à un vecteur d'état). On ne l'interprète donc jamais en termes de « et » (*i.e.* il représenterait une sorte de superposition de tel état physique *et* de tel autre état physique *et...*), mais toujours en termes de « ou » (*i.e.* il prédit que tel résultat va survenir avec telle probabilité *ou* que tel autre résultat va survenir avec telle autre probabilité *ou...*).
- Étant donné que la théorie de la décohérence est une application du formalisme mathématique de la mécanique quantique, on ne peut attendre d'elle que puisse rendre compte de ce qui devient actuel lors d'une mesure. Elle n'a qu'une fonction prédictive et n'a pour objet que les résultats possibles de mesures possibles. Il n'y a donc pas à chercher, au moyen de cette théorie, à dériver un opérateur densité associé à $S+M$ au terme de la mesure qui représente un mélange statistique *propre*.

Dans le prolongement de mon travail de thèse, j'ai organisé les 22 et 23 février 2007 un colloque intitulé « Pragmatisme & Mécanique Quantique » (CREA, UMR École Polytechnique et CNRS) au Ministère de la Recherche à Paris. Celui-ci avait pour objet la discussion des deux questions suivantes : « Quel est l'apport du pragmatisme dans le champ de la philosophie des sciences ? » et « Plus particulièrement, le pragmatisme est-il pertinent pour interpréter la mécanique quantique ? ». La première question a été explorée par plusieurs spécialistes de la philosophie pragmatiste, Christiane Chauviré, Guillaume Garetta, Mathias Girel et Claudine Tiercelin, mais aussi par un philosophe des sciences ayant développé des arguments contre le pragmatisme, Ian Hacking. La seconde question a été examinée d'abord par trois spécialistes de la mécanique quantique favorables à une approche pragmatiste, Chris Fuchs, Willem de Muynck et moi-même, puis, dans le cadre d'une table ronde, par trois spécialistes critiques vis-à-vis d'une telle approche, Alexei Grinbaum, Etienne Klein et Hervé Zwirn. Ce colloque a permis de mettre en lumière des apports spécifiques du pragmatisme en philosophie des sciences et pour l'interprétation de la mécanique quantique. Il a également permis d'identifier des points faisant débat, en philosophie des sciences (notamment, sur le statut des entités postulées par les théories) et concernant la mécanique quantique (en particulier, sur la possibilité de « résoudre » *versus* « dissoudre » le problème de la mesure).

2.4 Y a-t-il des moyens de connaissance universels en physique ?

L'approche pragmatiste développée durant mon doctorat a permis de montrer, d'une part, que de nombreux éléments de la mécanique quantique peuvent être justifiés en termes de fonctions occupées dans le cadre de l'activité de recherche en microphysique (c'est le cas, par exemple, pour les espaces de Hilbert ou l'équation de Schrödinger) et, d'autre part, qu'un élément de cette théorie apparaît comme la traduction d'une contrainte empirique fondamentale qui a émergé dans le cadre de cette activité de recherche (à savoir, l'incompatibilité de certaines observables). On peut dire que les éléments de la mécanique quantique recevant une justification en termes de fonctions pragmatiques présentent un caractère *relatif* : ils sont « relatifs » à l'activité de recherche en microphysique. Sur cette

idée du caractère relatif d'une partie de la théorie, l'approche pragmatiste rejoint l'une des deux variantes des interprétations néokantiennes de la mécanique quantique, celle qualifiée de « pragmatico-transcendantale ». Cette variante développée par Bitbol (1996, 1998) vise à mettre en lumière dans la théorie des *a priori* relatifs, au sens de Cassirer (1977 [1910]), c'est-à-dire des « conditions de possibilité de la connaissance », pour reprendre l'expression de Kant, qui sont relatifs à l'activité de recherche en microphysique (voir Kauark-Leite, 2012). La seconde variante des interprétations néokantiennes peut être qualifiée d'« absolutiste ». Cette variante proposée notamment par Lyre (2000), dans la ligne des travaux de von Weizsäcker (1985), s'efforce de dégager des *a priori* absolus de la physique en général : non seulement de la mécanique quantique, mais aussi de la physique classique ou des théories de la relativité restreinte et générale. Deux exemples de tels *a priori* absolus sont la « distinguabilité » et la « temporalité ». Sans adhérer au programme d'une reconstruction absolutiste de la physique, je me suis nourri de la lecture de von Weizsäcker et de Lyre pour faire évoluer mon questionnement sur les fondements de la physique : outre les éléments relatifs et empiriques de la mécanique quantique, n'existe-t-il pas des éléments de cette théorie qui seraient communs avec l'ensemble des théories physiques et qui, en ce sens, pourraient être considérés comme « universels » ?

Ce questionnement a débouché sur un projet de recherche que j'ai mené dans le cadre d'un post-doctorat à l'Université de Dortmund, dans l'équipe de Brigitte Falkenburg, avec un financement européen (bourse Marie-Curie). Ce projet s'est inscrit dans un cadre de pensée anti-réaliste, entre le pragmatisme et la philosophie kantienne, considérant que ces deux approches peuvent apporter des éclairages complémentaires sur les théories physiques. L'objectif général était d'examiner divers moyens de connaissance mobilisés en physique afin de déterminer s'ils peuvent être considérés comme universels ou seulement comme relatifs. J'ai proposé de distinguer quatre types de moyens de connaissance :

- Les moyens *instrumentaux* de connaissance, c'est-à-dire les appareils permettant de réaliser des mesures sur les systèmes étudiés ;
- Les moyens *sensoriels* et les moyens *conceptuels* de connaissance, lesquels permettent conjointement de percevoir les résultats de mesure, d'y faire référence et de les organiser ;
- Les moyens *mathématiques* de connaissance, qui permettent de prédire (de façon déterministe ou seulement probabiliste) et d'interpréter les résultats de mesure.

Mon hypothèse est qu'une telle étude peut contribuer à mieux cerner l'origine, le statut et la fonction des différents moyens de connaissance en physique et, en particulier, en mécanique quantique. Dans ce projet de recherche, j'ai proposé de centrer l'investigation sur deux moyens de connaissance que certains auteurs ont présenté comme universels ou comme comportant des caractéristiques universelles, à savoir les appareils et les résultats de mesure (dont le caractère universellement « classique » a été supposé par Bohr) et l'espace (dont le caractère universel avait été supposé par Kant). Deux études, menées respectivement sur les résultats de mesure et l'espace, vont être présentées dans les deux sections suivantes.

2.5 La coupure classique/quantique à la lumière de la contribution de Bohr

La première étude consistait à examiner la thèse de Bohr selon laquelle les résultats de mesure doivent nécessairement être décrits au moyen de « concepts classiques ». Affirmer que les concepts classiques sont « nécessaires » pour une telle description revient à

considérer que ceux-ci constituent des moyens de connaissance universels. Quelle est la justification apportée par Bohr ? Celle-ci est-elle acceptable au regard de la physique actuelle ? L'étude de ces questions a donné lieu à une publication dans la revue *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* (Bächtold, 2008c). Plus récemment, j'ai repris et affiné cette étude dans le chapitre d'un livre coordonné par Jan Faye et Henry Folse (Bächtold, 2017), en examinant la contribution de Bohr concernant les problèmes liés à la transition quantique-classique.

Le processus de la mesure, dont il a été question plus haut (sections 2.2 et 2.3), est communément présenté comme le lieu d'une transition entre le domaine du quantique vers celui du classique. Cette transition apparaît problématique. En effet, alors que les systèmes microscopiques sont décrits au moyen de la mécanique quantique, les résultats obtenus lors de la réalisation d'une mesure sur de tels systèmes nous « apparaissent » comme étant « classiques », pour reprendre les termes de Guilini et al. (2003). Comment l'apparence classique des résultats de mesure émerge-t-elle (problème A) ? Ce problème peut se voir comme une variante du problème de la mesure. Sa résolution peut s'envisager en partie dans le domaine de la physique elle-même. De fait, la théorie de la décohérence apporte des éléments de réponse (Zurek, 1981, 1982, 1991, Blanchard et al., 2000, Joss et al., 2003), en particulier en déterminant une « base préférée » (voir section 2.2). Un autre problème se pose corrélativement à celui de la transition quantique-classique : pourquoi, après tout, ne pourrions-nous pas décrire les résultats de mesure au moyen de la mécanique quantique (problème B) ? À propos de la transition ou plutôt de la coupure quantique/classique, la contribution de Bohr a été particulièrement influente et discutée. Celle-ci reste aujourd'hui un point de départ très intéressant pour discuter les deux problèmes mentionnés ci-dessus, comme le montrent plusieurs chapitres du récent livre coordonné par Faye et Folse (2017). Dans ce qui suit, je vais résumer les principaux éléments des deux études mentionnées ci-dessus (Bächtold, 2008c, 2017a) afin de clarifier la contribution de Bohr relativement aux deux problèmes A et B et, par ce biais, explorer l'idée selon laquelle les concepts classiques correspondent à des moyens de connaissance universels.

Bohr a exprimé sa thèse à de nombreuses reprises dans ses écrits et sous des formes légèrement différentes. Voici deux exemples de formulation : « toute expérience doit ultimement être décrite en termes de concepts classiques » (Bohr, 1934), « le compte-rendu de tout résultat doit être exprimé en termes classiques » (Bohr, 1958). Notons qu'il est parfois reproché à Bohr d'avoir exprimé ses idées de façon peu claire. S'agissant de sa thèse concernant les concepts classiques, il est vrai qu'elle a été discutée par Bohr sous différents angles et en mobilisant plusieurs arguments. Afin de restituer sa pensée de façon la plus claire et la plus structurée possibles, j'ai proposé de mettre en avant quatre distinctions opérées par Bohr, à partir desquelles il est possible de comprendre sa thèse et ses arguments :

- *La distinction entre les « concepts classiques » et la « description de la physique classique »* : Bohr a soutenu que tous les résultats de mesure doivent être décrits soit au moyen du « concept classique » de la coordination (ou localisation) dans l'espace et le temps, soit par le « concept classique » de causalité (ou de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement), mais non que ces résultats doivent recevoir une « description de la physique classique », laquelle implique une application simultanée des deux concepts précédents (ce qui est exclu en microphysique) ;

- *La distinction entre la description de l'appareil de mesure et la description des résultats de mesure* : la thèse de Bohr concerne avant tout la description des résultats de mesure ; cette description doit être faite au moyen des concepts classiques ; Bohr a également soutenu que les appareils de mesure ainsi que les marques permanentes produites au niveau de ces appareils doivent être décrits au moyen des concepts classiques ; cependant, ceci n'est requis que pour assurer la possibilité de décrire le résultat de mesure (i.e., pour interpréter la marque permanente) au moyen des concepts classiques ;
- *La distinction entre le système et l'appareil* : pour être objectif, l'information concernant un système microscopique obtenue par une mesure doit être communicable sans ambiguïté ; or, la communication non ambiguë implique une distinction qui doit être faite mentalement (i.e., par la pensée) entre le système et l'appareil de mesure ; cette distinction se trouve être en contradiction avec l'« individualité » de la mécanique quantique (expression de Bohr pour désigner l'idée selon laquelle le système microscopique et l'appareil de mesure, une fois qu'ils ont interagis, forme un tout indivisible), de sorte que nous n'avons pas d'autre choix que de faire usage des concepts de la physique classique, lesquels se basent tacitement sur une telle distinction ;
- *La distinction entre le système et l'observateur* : la distinction système/observateur constitue une autre distinction opérée par Bohr qu'il convient de ne pas confondre avec celle entre le système et l'appareil ; afin d'éviter toute subjectivité dans la description du résultat de la mesure (dont la dépendance à l'égard de l'observateur concerne le choix qu'il fait de l'appareil utilisé), cette description du résultat de mesure doit aussi inclure explicitement la description de l'appareil.

Faisons remarquer que cette dernière idée, selon laquelle la description d'un résultat de mesure, pour être dénuée de subjectivité, doit également spécifier l'appareil utilisé, apparaît aujourd'hui obsolète. En effet, lorsque les physiciens se communiquent les résultats de mesure obtenus, ils peuvent en général se contenter de préciser l'observable qui a été mesurée. Bien entendu, la connaissance de l'appareillage expérimental est requise pour déterminer l'observable mesurée. Toutefois, une fois l'observable déterminée, il n'est en général plus besoin de mentionner quel a été exactement l'appareillage expérimental utilisé. Le fait que cette idée ne soit aujourd'hui plus pertinente n'affecte cependant pas la thèse centrale de Bohr sur la nécessité d'utiliser des concepts classiques, car elle n'en n'est ni une prémisse ni une conséquence. Elle ne fait que partager avec elle une même motivation, à savoir celle de chercher les conditions d'une communication non-ambiguë des résultats de mesure.

Par ailleurs, la distinction entre le système et l'appareil, au cœur de l'argumentation de Bohr en faveur de sa thèse, repose sur l'idée d'individualité qui de prime abord semble également obsolète. Si l'expression « individualité » n'est effectivement plus en usage chez les physiciens (ou plutôt, ne l'a jamais été), elle peut néanmoins être considérée comme un précurseur de l'idée largement admise aujourd'hui d'« intrication » entre les vecteurs d'état associés à deux systèmes ayant interagis (expression introduite initialement par Schrödinger en 1935 pour parler de l'impossibilité de dissocier, non pas les états physiques de ces systèmes, mais les probabilités concernant les résultats pouvant être obtenus lors de mesures sur ces systèmes). L'intrication, à l'instar de l'individualité, signifie que deux systèmes ayant interagis ne peuvent plus être conçus comme physiquement distincts. Par

conséquent, l'argumentation en faveur de sa thèse ne peut pas être écartée au simple motif qu'elle repose sur l'idée d'individualité.

En revanche, la question se pose de savoir si cette thèse est rejetée par la théorie de la décohérence. À cet égard, Camilleri et Schlosshauer (2015) ont produit une analyse détaillée conduisant à une réponse négative. Ces auteurs pointent le fait que la thèse de Bohr concerne en réalité un problème différent de celui visé par la théorie de la décohérence : cette thèse est liée au problème B (suivant la notation ci-dessus) qui concerne la manière dont on peut décrire les résultats de mesures réalisées sur des systèmes microscopiques, tandis que la théorie de la décohérence apporte un élément de réponse au problème A, celui de la transition quantique-classique, c'est-à-dire de l'émergence de l'apparence classique des résultats de mesure. En outre, Camilleri et Schlosshauer soulignent que la thèse de Bohr est de « nature épistémologique » et non « ontologique » : Bohr n'a pas soutenu que les appareils de mesure *sont* des objets classiques ontologiquement parlant ; l'exigence qu'ils soient décrits en termes de concepts classiques est d'ordre épistémologique. Bohr n'a jamais affirmé qu'ils ne pouvaient pas être décrits au moyen de la mécanique quantique, ce qui de fait est réfuté par l'existence même de la théorie de la décohérence.

L'approche de Bohr est clairement de nature épistémologique et on peut se demander si une telle approche ne permet pas d'apporter un éclairage pertinent concernant le problème de la transition quantique-classique, lequel n'a été que partiellement résolu par la théorie de la décohérence. Cette dernière n'aboutit en effet qu'à des mélanges statistiques *impropres* (en raison de la présence de termes d'interférences, lesquels sont insignifiants d'un point de vue pratique mais néanmoins non strictement égaux à zéro).

Revenons à l'argumentation de la thèse de Bohr telle qu'elle a été reconstruite ci-dessus : les résultats de mesure doivent être décrits au moyen de concepts classiques parce qu'ils sont les seuls concepts disponibles reposant sur une distinction entre le système étudié et l'appareil de mesure ; cette distinction doit être opérée car autrement il n'est simplement pas possible d'exprimer une information non ambiguë concernant le système. Or, le fait que les concepts requis pour décrire les résultats de mesure sans ambiguïté sont ceux développés dans le cadre de la physique classique apparaît contingent. Autrement dit, le caractère classique de ces concepts n'est pas fondamental. L'idée principale, selon moi, au cœur de l'argumentation de Bohr est que nous devons opérer une distinction entre le système et l'appareil et que cette distinction doit être supposée dans toute description d'un résultat de mesure. Cette distinction, plutôt que l'usage de concepts classiques, pourrait être considérée comme une condition *universelle* de possibilité de toute description des résultats de mesure.

Suivant la ligne de raisonnement de Bohr, j'ai ainsi proposé l'idée selon laquelle cette distinction doit être introduite *a priori* dans le formalisme de la mécanique quantique si ce formalisme est destiné à faire des prédictions concernant les résultats de mesure sur un système microscopique. Observons que, de fait, la distinction entre le système microscopique étudié et l'appareil de mesure est opérée dès le départ dans le cadre de toute description quantique de la mesure, de même que dans le cadre de la théorie de la décohérence. Du point de vue épistémologique, la distinction système/appareil est première : elle détermine ce qui doit être dérivé de la théorie, à savoir la description d'un résultat de mesure qui implique une distinction bien définie entre le système microscopique et l'appareil. À cet égard, la distinction de Bohr fait figure d'idée régulatrice, au sens de Kant, pour les recherches en physique qui traitent du problème de la transition quantique-

classique. Elle ne lui apporte pas une solution, mais nous conduit à le considérer et donc à le formuler d'une manière nouvelle : comment rendre compte de la transition entre une description quantique, caractérisée par l'intrication entre les vecteurs d'état associés au système microscopique et à l'appareil de mesure, et une description du résultat de mesure impliquant une distinction bien définie entre ces deux systèmes ?

2.6 Quels sont le statut et la fonction du concept d'espace ?

La seconde étude visant à explorer l'idée du caractère universel de certains moyens de connaissance a porté sur le concept d'espace. La démarche que j'ai suivie a consisté à revenir sur la conception de Kant, car elle constitue la référence majeure sur cette question, puis à examiner les critiques qui lui ont été adressées, avant de défendre une conception néo-kantienne. Cette étude a été publiée dans la revue *Kant-Studien* (Bächtold, 2011) (long délai éditorial après acceptation). L'intérêt d'une telle étude est qu'elle peut apporter un éclairage sur le statut et la fonction du concept d'espace. J'en présente ici les principaux éléments.

Dans la *Critique de la raison pure*, Kant (1967 [1781, 1787]) défend l'idée selon laquelle l'espace est une « forme *a priori* », dont nous disposons avant toute expérience et, plus précisément, une forme *a priori* de la « sensibilité », autrement dit une forme que nous imposons à nos sensations, lesquelles correspondent à un pur donné. En informant nos sensations par la forme de l'espace, nous constituons des objets de perception. Kant avance deux arguments en faveur de cette conception. Le premier peut être reformulé ainsi : pour pouvoir constituer des objets de perception (ou de représentation) à partir de nos sensations, c'est-à-dire pour pouvoir interpréter ces sensations en termes de perception d'objets individualisés, qui se trouvent dans des lieux extérieurs à moi et séparés les uns des autres, il nous faut nécessairement présupposer l'espace. Cela signifie que nous ne pouvons percevoir ou nous représenter un objet qui ne se situerait pas dans l'espace. Cet argument revient à dire : l'espace est une *condition de possibilité* de la perception et de la représentation des objets, par conséquent, il *précède* l'expérience que nous pouvons en faire, ou autrement dit, il est *a priori*. Dans la mesure où il est non seulement *a priori*, mais également *condition de possibilité* de la perception et de la représentation d'un objet, l'espace possède un statut « transcendantal ». Mais Kant ne s'en tient pas là. Il soutient en outre que les *propriétés* de l'espace peuvent être connues de façon *a priori*. Quelles sont ces propriétés ? D'après Kant, l'espace forme une unité, il est unique, infini, continu, homogène, isotrope, euclidien et il a trois dimensions. En conférant à l'espace ces propriétés, Kant a probablement été influencé par l'état des sciences de son époque. L'espace ainsi défini correspond très exactement à l'espace présupposé par la physique de Newton.

Plusieurs objections ont été formulées à l'encontre de la thèse de Kant, certaines d'ordre philosophique, d'autres basées sur la physique contemporaine (et plus précisément, la théorie de la relativité générale), d'autres encore basées sur la psychologie du développement cognitif. Considérons ici ces deux derniers types d'objections. La théorie de la relativité générale montre qu'il est possible *de fait* de constituer la connaissance empirique en présupposant que l'espace est non-euclidien. Cela signifie que l'espace euclidien n'est pas le seul qui rende possible la connaissance. L'argument de Kant selon lequel la connaissance du caractère euclidien de l'espace serait *a priori* est donc mis en défaut. Devons-nous alors en conclure que la structure de l'espace est déterminée par l'expérience, comme l'ont notamment pensé Gauss et Lobachevski lorsqu'ils développèrent les premières formes de géométries non-euclidiennes (Jammer, 1993) ? De prime abord,

l'expérience et en particulier l'observation de la déviation de la lumière venant d'une étoile lorsque sa trajectoire passe à proximité du Soleil (Eddington, 1920) semblent valider la théorie de la relativité générale, et ce faisant, l'idée que l'espace est non-euclidien. On peut en effet rendre compte de cette observation grâce à la théorie de la relativité générale : la déviation de la lumière serait due à la courbure de l'espace-temps que provoque le champ de gravitation du Soleil – une telle courbure ne pouvant être décrite que dans le cadre d'une géométrie non-euclidienne. Cependant, rien ne nous empêche d'imaginer que la déviation de la lumière puisse être expliquée à l'aide d'une nouvelle théorie optique, selon laquelle la trajectoire de la lumière n'est pas toujours rectiligne, et ce, sans qu'il soit besoin de renoncer à la géométrie d'Euclide. C'est une alternative que Poincaré (1968 [1902]) avait imaginée avant même l'élaboration de la théorie de la relativité générale. Bien qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune théorie optique alternative qui explique la déviation de la lumière sans abandonner la géométrie d'Euclide, cette option demeure possible *en principe*. La possibilité de tirer ces deux conclusions différentes constitue une illustration de la « sous-détermination » de la théorie par l'expérience évoquée plus haut (section 2.2). Dans le cas présent, l'expérience ne permet pas de déterminer univoquement quelle géométrie décrit adéquatement l'espace. Elle détermine seulement quels sont les ensembles d'hypothèses théoriques, comportant un sous-ensemble d'hypothèses géométriques, qui sont aptes à rendre compte des données expérimentales et lesquels ne le sont pas. Pour Poincaré, le choix parmi les différents ensembles d'hypothèses théoriques en accord avec l'expérience se fait alors de manière *conventionnelle*.

Par ailleurs, au tournant du XIXe et du XXe siècles, plusieurs savants-philosophes, tels que Mach (1996 [1886]), James (2003 [1892]) ou Poincaré (1921, 1968 [1902], 1970 [1905]), ont mis en lumière l'idée selon laquelle nous ne disposons pas d'emblée un espace avec des propriétés bien définies (celles d'un espace unique, infini, continu, homogène, isotrope, euclidien et tri-dimensionnel), mais qu'au contraire, nous constituons progressivement cet espace. D'après Poincaré, à travers nos expériences, nous prenons conscience des « déplacements » des objets et de notre propre corps ; nous identifions alors certaines relations entre ces déplacements ; or ces relations forment un groupe au sens mathématique du terme ; ce « groupe de déplacements » que notre expérience nous fait connaître est à l'origine de l'espace tel que nous nous le représentons communément. À partir des années 1930, Piaget et ses collaborateurs (1972, 1973, 1977 [1936]) ont mené des recherches empiriques sur les étapes et les mécanismes psychologiques précis qui sous-tendent la constitution progressive de l'espace (perceptif puis représentatif) correspondant à un groupe de déplacements au sens de Poincaré. Ces recherches montrent que cette genèse est tributaire de l'expérience que fait un enfant. Par conséquent, la structure de l'espace que celui-ci se constitue n'a rien de nécessaire, elle est au contraire *contingente* : on peut imaginer que cet espace se structure de diverses manières, en fonction des expériences qui sont faites et en fonction de la manière dont ces expériences sont mises en ordre. Antérieurement à ces travaux empiriques, Poincaré avait proposé une argumentation d'ordre théorique concernant chacune des propriétés assignées par Kant à l'espace – l'unicité, l'infinité, la continuité, l'homogénéité, l'isotropie, le caractère euclidien et le caractère tri-dimensionnel – visant à établir le fait que chacune d'elles résulte d'une mise en ordre contingente de nos sensations. Présentons à titre d'illustration son argumentation concernant le caractère continu de l'espace (Poincaré, 1921) : partant de l'observation qu'un déplacement « suffisamment grand » peut être divisé par deux, nous pouvons conjecturer soit (i) qu'il est possible de poursuivre à l'infini cette division par deux d'un élément de

déplacement et ainsi aboutir à l'idée que l'espace est continu, soit (ii) que cette divisibilité ne se poursuit que jusqu'à un déplacement atomique (lui-même indivisible) de sorte que l'espace est conçu comme discontinu ; étant donnée notre incapacité à discerner en pratique deux déplacements lorsqu'ils sont trop petits, les deux alternatives demeurent envisageables ; c'est uniquement en raison du constat que la limite de l'indiscernabilité de deux déplacements a pour l'heure toujours pu être repoussée grâce à de nouveaux instruments que nous avons opté « par induction » pour la première alternative.

Pour autant, l'approche de Kant concernant l'espace n'est pas entièrement obsolète et présente l'intérêt de mettre en évidence le statut et la fonction de l'espace. À cet égard, il convient d'opérer une distinction entre, d'une part, le statut transcendantal que Kant assigne à l'espace, et d'autre part, les propriétés qu'il confère à cet espace. En effet, l'idée que l'espace possède un statut transcendantal, ou plus exactement qu'il soit condition de possibilité de la perception d'un objet, ne signifie pas que cet espace doive nécessairement avoir telle ou telle structure. Rien n'exclut *a priori* que plusieurs structures spatiales distinctes puissent posséder un caractère transcendantal. Cassirer (2000 [1920]) a mis en avant la distinction entre « espace transcendantal » et « espace empirique » pour défendre la position kantienne face aux objections des philosophes empiristes (tels que Schlick) invoquant la théorie de la relativité générale. Il souligne ainsi que « le caractère *a priori* de l'espace, que [la philosophie kantienne] pose comme condition de toute théorie physique, n'implique aucune affirmation [...] en ce qui concerne la détermination particulière de la structure de l'espace » et ajoute que « la conception fondamentale de l'espace et du temps, que développe la théorie de la relativité, est et demeure une théorie qui porte sur l'espace et le temps empiriques ». Si les objections évoquées ci-dessus mettent en cause les propriétés que Kant attribue à l'espace, elles ne semblent pas atteindre l'idée du caractère transcendantal de l'espace.

Quelle est alors la fonction de l'espace dans sa dimension transcendantale selon Kant ? Cette question a été discutée par plusieurs spécialistes de Kant (Moreau, 1984, Warren, 1998, Delfour, 2003, Dufour & Servois, 2005). Cette discussion pointe vers une fonction essentielle de l'espace, dont nous pouvons avoir une connaissance *a priori* et qui résiste à l'attaque d'une approche empiriste : *l'espace rend possible la représentation des objets comme extérieurs les uns aux autres, et par conséquent, comme distincts et individualisés*. À cet égard, l'espace apparaît comme une condition fondamentale de la possibilité de toute connaissance en général ou, autrement dit, comme un *moyen universel de la connaissance*.

Dans la suite de cette étude, je me suis inscrit dans la ligne des philosophes néo-kantiens comme Cassirer pour défendre l'idée selon laquelle l'espace avec des propriétés spécifiques (ex : euclidien ou non-euclidien) ne peut certes pas être considéré comme universel, mais néanmoins comme un *a priori* relatif, c'est-à-dire comme un principe admis provisoirement dans le cadre d'une théorie donnée et sur lequel s'appuie la constitution de nouvelles connaissances. Par exemple, dans le cadre de la mécanique de Newton, la constitution de nouvelles connaissances repose sur le présupposé d'un espace euclidien, tandis que, dans le cadre de la théorie de la relativité générale, elle repose sur le présupposé d'un espace non-euclidien.

Cette étude menée durant mon post-doctorat (à Dortmund) a constitué l'arrière-plan théorique sur lequel je me suis appuyé plus tard (à Montpellier) lors de ma participation à un travail collectif sur les géométries non-euclidiennes (GNE) dans le groupe IREM de Montpellier intitulé « Mathématiques et Philosophie » puis « Mathématiques, Physique et Philosophie » (groupe dont je suis co-responsable avec Thomas Hausberger). Ce travail

collectif a conduit à l'élaboration d'une séquence didactique pour la classe de Terminale. Cette séquence propose une exploitation approfondie de l'exemple des GNE lesquelles constituent un objet interdisciplinaire dont l'étude est potentiellement très riche : non seulement dans le cadre de l'enseignement de la philosophie, en particulier pour traiter la question de la vérité, mais également dans celui de l'enseignement des mathématiques, pour discuter la notion d'axiome et les rapports des mathématiques avec le réel, et pour travailler le raisonnement et la logique. Nous avons développé cette séquence de façon collaborative et itérative, c'est-à-dire par des allers-retours entre conception et expérimentation. Nous avons privilégié une approche didactique interdisciplinaire, c'est-à-dire qui ne se contente pas de juxtaposer les regards mathématique et philosophique, mais qui s'efforce de les combiner pour en tirer un bénéfice mutuel : d'un côté, le travail mathématique des GNE avec les élèves permet de rendre plus substantiel l'exemple jouant le rôle de support au questionnement philosophique sur la vérité, de l'autre, la contextualisation des exercices mathématiques dans le cadre d'une réflexion philosophique apporte du sens aux notions mathématiques enseignées. Le dispositif didactique repose sur la co-intervention d'enseignements de philosophie et de mathématiques. Nous présentons la séquence, les enjeux dont elle se saisit et l'analyse d'expérimentations menées dans deux classes de Terminale S dans un article à paraître de la revue *Repères IREM* (Bächtold, François, Hausberger & Marie-Jeanne, 2018). À noter qu'à l'occasion de l'exploration des enjeux philosophiques associés aux GNE, j'ai étudié plus précisément la contribution de Poincaré et publié un article à ce sujet dans la revue *L'enseignement philosophique* (Bächtold, 2013a).

2.7 Quels sont le statut et la fonction du concept d'atome ?

Dans le cadre toujours de mon post-doctorat et après avoir mené ces deux études sur les moyens de connaissance caractéristiques des activités de recherche en microphysique, je me suis penché sur le statut et la fonction du concept d'atome. À l'instar de l'électron, l'atome constitue l'un des exemples les plus discutés en épistémologie sur la question de l'existence des « entités théoriques », c'est-à-dire les entités postulées par des théories et qui ne sont pas observables directement par nos sens. Schématiquement, cette question oppose réalistes scientifiques et anti-réalistes. Les deux arguments majeurs des anti-réalistes ont été évoqués plus haut : la « sous-détermination de la théorie » par l'expérience et la « méta-induction pessimiste » (section 2.2). S'agissant des réalistes scientifiques, leur principal argument est généralement formulé de deux manières différentes. Suivant sa première formulation, il est appelé l'argument « du non miracle » : les théories postulant les atomes ont beaucoup de succès sur le plan prédictif ; la meilleure façon d'expliquer ce succès prédictif est d'admettre que ces entités existent effectivement ; autrement dit, si ces entités n'existaient pas, ce succès prédictif tiendrait du « miracle » (Putnam, 1975, p. 73). Suivant sa seconde formulation, qui peut être considérée comme équivalente, il est appelé l'argument « de la non-coïncidence : l'hypothèse de ces entités permet d'interpréter simplement de très nombreuses expériences et d'en prédire de nouvelles ; cela ne peut pas être une « coïncidence », ces entités doivent effectivement exister (Hacking, 1983, pp. 200-203, Cartwright, 1983, pp. 83 et 92). Cet argument, dans sa deuxième formulation, prend ses racines dans un épisode fameux de l'histoire de l'atomisme (Chalmers, 2005), lorsque Perrin en 1913 publie son ouvrage intitulé « Les atomes » où il rend compte d'au moins 13 méthodes expérimentales différentes conduisant à l'obtention de la même valeur empirique pour le nombre d'Avogadro (i.e., défini aujourd'hui comme le nombre d'atomes dans 12

grammes de carbone, isotope 12) ; suite à cette publication, le plus ardent opposant à l'idée qu'il existe des atomes, Ostwald, s'avoue convaincu. Cet épisode est couramment présenté comme mettant un terme à une dispute intense à la fin du XIXe siècle entre Boltzmann et Mach, et donnant raison au premier qui défendait l'idée de l'existence des atomes. Or, on peut remarquer que la conception de l'atome qui a été retenue dans la physique du XXe siècle n'a plus grand-chose à voir avec celle du XIXe siècle : l'image de boules de billard microscopiques, indivisibles et ayant des trajectoires bien définies a volé en éclats avec l'avènement de la mécanique quantique. Si les physiciens du XXe siècle considèrent tous que les atomes « existent », et ce fût le cas également de Bohr, la question de savoir ce que sont ces atomes et, par suite, qu'est-ce qui « existe », demeure très problématique.

Ces considérations m'ont conduit à m'intéresser à la position de Mach. Quels furent ses arguments ? Ont-ils effectivement été réfutés ? L'exploration de ses écrits m'a amené à soutenir que nous pouvons en fait y puiser des éléments pertinents pour mieux circonscrire le statut et la fonction du concept d'atome. Cette étude a donné lieu à la publication d'un article dans *Journal for General Philosophy of Science* (Bächtold, 2010). Dans cette étude, j'ai d'abord examiné en détail les différents arguments de Mach, cherché à les catégoriser, avant de les soumettre à une évaluation à l'aune de la physique actuelle. Les arguments contre l'atomisme peuvent être résumés comme suit :

- (a) Les atomes n'existent pas en soi : une chose en soi est une fiction, c'est-à-dire un produit de notre esprit lorsque nous occultons les relations de cette chose avec les phénomènes ; une chose en soi, dans la mesure où nous ne pouvons pas être en relation avec elle, ne peut par principe être connue.
- (b) Le concept d'atome est uniquement un symbole de pensée pour un complexe de sensations : les sensations sont premières, elles sont l'unique objet possible de notre expérience ; nous assemblons ensuite les sensations en complexes et nous leur associons des étiquettes, des noms.
- (c) L'hypothèse des atomes n'est pas fructueuse : en menant des recherches en physique sur les raies spectrales de gaz en faisant l'hypothèse des atomes, Mach s'est lui-même heurté à des problèmes scientifiques qui l'ont conduit à considérer cette hypothèse comme n'ayant pas de pouvoir heuristique.
- (d) L'hypothèse des atomes est artificielle : aucune expérience ne permet de mettre directement en évidence l'existence des atomes.
- (e) L'hypothèse des atomes, conçus comme des entités occupant un espace tridimensionnel, est injustifiée : le caractère tri-dimensionnel est propre aux objets de la perception ; or, les atomes ne sont pas des objets de la perception.

Les trois derniers arguments se situent à un *niveau scientifique* et portent sur des questions telles que « L'atomisme rend-t-il compte de manière satisfaisante des expériences ? » ou « Aide-t-il à prédire de nouveaux phénomènes ? ». Du point de vue de la physique actuelle, aucun d'eux n'est aujourd'hui défendable. En revanche, les deux premiers arguments se situent à un *niveau épistémologique* et renvoient à des questions telles que « Du succès (ou de l'échec) de l'atomisme sur le plan scientifique, pouvons-nous inférer que les atomes existent (ou n'existent pas) ? ». Dans la mesure où ils se situent à un niveau strictement épistémologique, les deux premiers arguments ne peuvent pas être réfutés par les avancées en sciences.

Que nous disent et que nous apportent ces deux arguments ? Le premier revient à soutenir que nous ne pouvons connaître les atomes que tels qu'ils nous apparaissent indirectement par l'intermédiaire des phénomènes, c'est-à-dire par l'intermédiaire de ce qui est observable dans le cadre d'expériences. Le second consiste à affirmer que l'étiquette « atome » permet de se référer de manière synoptique et unifiée à tout un ensemble d'expériences ; autrement dit, le concept d'atome remplit une fonction pragmatique au sens défini plus haut (section 2.3). Ces deux arguments dessinent les contours d'une interprétation « instrumentaliste » du concept d'atome. À y regarder de plus près, loin d'avoir été contredite par les avancées scientifiques, cette interprétation a joué au contraire le rôle de guide méthodologique pour favoriser ces avancées. Deux exemples importants peuvent être donnés pour appuyer cette idée : le modèle atomique proposé par Bohr en 1913 et la formulation matricielle de la mécanique quantique développé par Heisenberg en 1925 pour décrire le comportement des atomes. Dans les deux cas, l'influence de l'épistémologie de Mach a été soulignée par les scientifiques eux-mêmes. La méthode qu'ils ont suivie a consisté à se focaliser sur les quantités associées aux atomes qui sont *observables* (à savoir, les valeurs des raies spectrales) et à chercher à les interconnecter au moyen d'outils mathématiques. Ce retour sur l'épistémologie de Mach permet ainsi d'apporter un éclairage à la fois sur la fonction remplie par le concept d'atome et sur la manière dont la physique quantique s'est en partie construite.

Qu'en est-il de l'argument de la non-coïncidence ? Celui-ci peut tout à fait être neutralisé en adoptant l'épistémologie de Mach : le fait que l'hypothèse des atomes permette d'interpréter simplement de *très nombreuses* expériences et d'en prédire de nouvelles signifie, non pas que les atomes tels que nous nous les représentons existent (ce qui consisterait à faire une extrapolation sans garantie et laisserait en suspens la question de la représentation de ces atomes), mais que le concept d'atome remplit sa fonction pragmatique avec une grande efficacité : il est un symbole de pensée qui permet de se référer de manière économique et unifiée à un *très large* ensemble d'expériences, réalisées ou futures.

Après mon recrutement à Montpellier en 2009, en parallèle de mes recherches en didactique de la physique, je me suis à nouveau intéressé au statut et à la fonction du concept d'atome. J'ai été sollicité par Jean-Pierre Llored pour contribuer à un ouvrage collectif sur l'épistémologie de la chimie chez Cambridge Scholars Publishing (Bächtold, 2013b). Suivant sa demande, j'ai tenté d'appliquer l'approche pragmatiste au cas de l'atome en chimie. N'étant pas spécialiste de cette discipline, j'ai été amené à explorer une littérature nouvelle avec des éléments sortant de mon domaine de compétence. Cependant, j'ai été rapidement frappé par le fait que l'approche pragmatiste, qui laisse de côté les questions ontologiques pour étudier la genèse des théories et les usages qui en sont faits dans la pratique des scientifiques », semble trouver un terrain d'application particulièrement propice dans le domaine de l'épistémologie de la chimie. Dans ce domaine scientifique, en effet, les manipulations des chercheurs et les effets observables de ces manipulations prennent une place majeure dans la constitution et l'usage des connaissances. Plusieurs auteurs, tels que Nye (1993), Psarros (1998), Schummer (1998, 2006), Zeidler (2000), Bensaude-Vincent (2003), Bensaude-Vincent & Simon (2008), Bernal & Dazal (2010), Llored (2010) et Harré & Llored (2011), ont mis en évidence des aspects de la chimie, de sa construction et de son fonctionnement, qui trouvent un écho dans un cadre de pensée pragmatiste. L'objectif de mon étude était d'esquisser une mise en œuvre possible du pragmatisme dans le domaine de l'épistémologie de la chimie. Le modèle atomique se

trouvant au cœur des discussions sur l'identité de la chimie, ou du moins, sur sa réduction ou non à la physique, je me suis efforcé de mener cette réflexion en me focalisant sur l'usage qui est fait du modèle atomique dans ce domaine, prolongeant ainsi l'étude précédente sur Mach.

Cette étude a été guidée par deux questions. La première était : quelle est la place occupée par le modèle atomique dans l'édifice théorique de la chimie ? D'après les manuels de chimie physique, ce modèle constituerait la pierre fondatrice de cette science. Ceux-ci débutent en effet très souvent leur exposé de la chimie par un chapitre sur la constitution atomique de la matière. Ainsi par exemple, la première partie du manuel américain de référence écrit par Atkins et de Paula (2010), *Physical Chemistry*, qui s'intitule « Fundamentals », décrit la matière en termes d'atomes. De prime abord, cette idée semble aller de soi. Elle se heurte néanmoins à plusieurs faits mis en lumière par l'histoire de la chimie depuis l'introduction du concept d'atome par Dalton.

Au cours du XIXe siècle, le modèle atomique, qui avait une forme encore rudimentaire (se résumant essentiellement à l'hypothèse d'entités chimiques indivisibles pouvant se combiner de multiples façons), constituait un instrument théorique utile qui accompagnait plutôt que fondait l'activité théorique des chimistes. Les études historiques convergent sur ce point. Ce qui importait en premier lieu aux chimistes, dans leurs activités de recherche, c'était de pouvoir décrire et prédire les propriétés de substances chimiques et la façon dont celles-ci réagissent entre elles (Schütt, 2003), et non de décrire la structure fondamentale du monde physico-chimique.

Au XXe siècle, le modèle atomique a fait l'objet de développements théoriques et c'est le modèle atomique de la mécanique quantique qui s'est imposé. Le domaine de la chimie quantique, c'est-à-dire de la mécanique quantique appliquée aux molécules de la chimie, fut développé notamment grâce aux contributions de Pauling, puis de Mulliken. Plusieurs éléments théoriques nouveaux et considérés comme fondamentaux furent apportés par la mécanique quantique à la chimie physique : en particulier, la notion de spin des électrons pour la compréhension des liaisons covalentes entre atomes et les fonctions d'onde pour la prédiction de certaines propriétés des molécules, telles que les niveaux d'énergie des électrons. Cependant, sur le plan pratique du calcul mathématique, il s'avère très difficile de trouver des solutions stationnaires à l'équation de Schrödinger mobilisée pour faire des prédictions concernant les systèmes complexes que sont les molécules de la chimie. En outre, le cadre conceptuel de la théorie quantique de l'atome doit être enrichi pour que celui-ci puisse être étendu aux molécules et permette d'apporter des explications aux propriétés et réactions chimiques. Par exemple Mulliken, pour les besoins de ses travaux théoriques en chimie quantique, en est venu à forger plusieurs nouveaux concepts, comme ceux d'« orbitale moléculaire » ou de « pouvoir liant » (Llored, 2010). D'une manière générale, la chimie physique ne résulte pas d'une stricte dérivation de la théorie quantique, mais apparaît comme un produit hybride associant le modèle quantique de l'atome aux connaissances empiriques de la chimie de laboratoire. En effet, plusieurs épistémologues de la chimie (Nye, 1993, Bensaude-Vincent & Stengers, 2001, Simões, 2003) pointent le fait que le cadre théorique de la chimie quantique est aveugle sans les connaissances expérimentales sur les substances chimiques accumulées par les chimistes depuis plus de deux siècles et les modèles et systèmes de classification développés sur la base de ces connaissances expérimentales.

La seconde question qui a guidé mon étude était : pourquoi les chimistes font-ils appel au modèle atomique ? Une réponse, qui se trouve dans bon nombre de manuels de référence

en chimie physique (ex : Atkins & de Paula, 2010), revient à dire : parce que la matière est *réellement* constituée d'atomes, ou autrement dit, parce que ce modèle décrit la réalité telle qu'elle est. Il s'agit d'une thèse ontologique, celle défendue par les réalistes scientifiques. Comme je l'ai évoqué plus haut, elle fait face à l'argument de « la sous-détermination de la théorie » par l'expérience, que l'on peut formuler ici comme suit : il existe en principe plusieurs modèles rivaux capables de rendre compte de l'ensemble des données expérimentales de la chimie ; par conséquent, il n'est pas justifié d'affirmer que le modèle atomique, parce qu'il est empiriquement adéquate, est vraie et que les atomes existent.

À cette seconde question, une réponse alternative peut être apportée au moyen d'une approche pragmatiste. Le principe de cette approche appliquée au domaine de l'épistémologie de la chimie pourrait être exprimé ainsi : *laisser la chimie en l'état et expliciter les articulations entre les outils théoriques et la pratique des chimistes afin de comprendre ce qui fait que cette science fonctionne*. Pour ce faire, j'ai proposé une démarche en deux étapes (qui correspond à une variante de celle mise en œuvre pour l'interprétation pragmatiste de la mécanique quantique) :

- *Première étape* : clarifier quels sont les buts des chimistes dans leurs pratiques.
- *Deuxième étape* : mettre en lumière la façon dont les différents éléments théoriques (conceptuels ou mathématiques) de la chimie permettent d'atteindre ces buts, ou plus précisément, (a) identifier les fonctions pragmatiques que chaque élément théorique remplit pour atteindre ces buts et (b) comprendre comment il remplit ces fonctions.

Quels buts les chimistes cherchent-ils à atteindre dans leurs pratiques ? Une exploration de cette question m'a conduit à soutenir que si le but de la chimie est, pour certains (Lawrence, Rodger & Compton, 1996), de décrire et prédire les propriétés des atomes et des molécules et la façon dont ils réagissent entre eux, c'est plus fondamentalement pour pouvoir décrire et prédire les propriétés de substances chimiques et la façon dont elles réagissent entre elles (McQuarrie & Rock, 2011). Par ailleurs, la vision épistémologique traditionnelle séparant nettement « sciences », d'un côté, et « sciences appliquées », de l'autre, se révèle quelque peu inopérante dans le cas de la chimie (Schummer, 2006). Ainsi, le but d'une partie des chimistes consiste, non pas simplement à analyser des substances chimiques, mais aussi à en synthétiser de nouvelles.

Afin de situer les fonctions pragmatiques du modèle atomique, il nous faut au préalable cerner celles de la classification chimique, que ce modèle permet de repenser. Classifier les substances chimiques et définir une nomenclature associée correspond à l'une des principales activités théoriques des chimistes (Schütt, 2003). Les substances chimiques sont actuellement classées en substances simples (ex : carbone, oxygène...) et en substances composées ou « composés », eux-mêmes classés en « familles » (ex : acides, alcools...), sous-familles, etc. (classification de l'UICPA). Quel est l'intérêt d'une telle classification ? Au moins quatre fonctions peuvent être identifiées :

- (A1) *Une fonction d'unification* : la classification réunit dans des familles, sous-familles, etc., de très nombreuses substances chimiques ayant en commun des « propriétés chimiques » qui sont similaires, ce que l'approche pragmatiste traduirait comme des effets observables potentiels résultant de certaines de leurs manipulations possibles qui sont similaires ;
- (A2) *Une fonction d'économie de pensée* : cette fonction (mise en avant par Mach) est corrélative de celle d'unification, puisque réunir des substances chimiques en familles, sous-familles, etc., permet de faire référence de manière synthétique à un

très grand nombre de substances chimiques, ayant donc en commun des propriétés chimiques similaires ;

- (A3) *La fonction d'assurer l'entente et la communication entre les chimistes* : en vertu de l'unification et de l'économie qu'elle assure, la classification permet aux chimistes de garantir qu'ils font référence à une même substance chimique particulière, ce qui ne va pas de soi étant donné le nombre très élevé de substances chimiques connues (le CAS en a répertorié 64 millions en janvier 2012) ; cette fonction rend possible l'exercice de la chimie comme une activité de recherche collective ;
- (A4) *La fonction de description et de prédiction* : la classification peut remplir cette fonction parce qu'elle remplit celle d'unification ; savoir qu'une substance chimique appartient à une famille permet de décrire et prédire les effets observables potentiels résultant de certaines de ses manipulations possibles, ceux caractérisant les substances chimiques de la famille en question ; ce faisant, la classification sert à la poursuite du but de la chimie décrit plus haut ; ajoutons que les trous dans la classification permettent de prédire l'existence de substances chimiques inconnues (Schummer, 1998).

Quel est l'intérêt du modèle atomique à cet égard ? D'une part, ce modèle joue le rôle de guide pour opérer la classification, et d'autre part, il permet d'accroître considérablement le pouvoir descriptif et prédictif de la classification. Plus précisément, le modèle atomique remplit les fonctions pragmatiques suivantes :

- (B1) *Une fonction de mise en relation des données empiriques* : le modèle atomique permet de tisser un réseau de relations entre les très nombreuses données empiriques à propos des substances chimiques (ou effets observables résultant des manipulations des chimistes) accumulées en chimie ; Cassirer (1977 [1910]) utilise à ce propos l'expression « réseau de relations empiriques » et précise que le concept d'atome joue à l'égard des données empiriques le rôle d'un « médiateur » ;
- (B2) *Une fonction d'unification* : étant mises en relation *via* la référence à des atomes et des molécules, les données empiriques, qui sont très nombreuses et très variées, sont traduites et réunies dans une même structure théorique (Llored, 2010) ;
- (B3) *Une fonction d'économie de pensée* : cette fonction est corrélative de celle d'unification, puisque réunir des données empiriques en les rapportant à des atomes et des molécules permet de faire référence de manière synthétique à ces données ; le modèle atomique prolonge ainsi l'économie de pensée opérée par la notion de substance chimique ;

C'est parce que le modèle atomique remplit ces deux fonctions, semble-t-il, qu'il joue le rôle de guide pour opérer la classification des substances chimiques.

- (B4) *Une fonction de description et de prédiction* : parce qu'il permet la mise en relation entre les données empiriques à propos des substances chimiques et leur unification, le modèle atomique offre une structure théorique pour décrire ces données et prédire le résultat d'expériences futures mettant en jeu des substances chimiques ; ce faisant, le modèle atomique sert à la poursuite du but de la chimie.

Les différentes fonctions pragmatiques du modèle atomique sont donc articulées les unes aux autres. La question qui demeure est : comment ce modèle remplit-il ces fonctions ? Les éléments de réponse que j'ai proposés sont les suivants :

- *Les noyaux atomiques (ainsi que les électrons de cœur) constituent des îlots de stabilité*: les réactions chimiques étudiées en chimie impliquent des transformations des propriétés chimiques des corps matériels en jeu (ou en termes pragmatistes, des changements des effets observables potentiels résultant des manipulations possibles de ces corps) ; les noyaux atomiques (et les électrons de cœur) utilisés pour décrire ces corps offrent un îlot de stabilité vis-à-vis de ces transformations ; ils permettent ainsi de concevoir les liens entre les propriétés chimiques des réactifs et celles des produits ;
- *Le modèle atomique a un caractère universel*: suivant le modèle atomique, les substances chimiques sont toutes constituées d'atomes parmi un ensemble restreint de types d'atomes différents (de l'ordre de 100), lesquels ont tous les mêmes types de constituants (électrons et nucléons) ; cette universalité fournit un cadre théorique pour concevoir les liens entre les substances chimiques dont les propriétés chimiques sont similaires et qui sont réunies dans des mêmes familles :
- *Le modèle atomique est facilement manipulable par la pensée*: qu'ils prennent la forme par exemple de lettres ou d'images mentales de petites boules, les représentants des atomes et de leurs constituants (électrons, protons et neutrons) sont des objets pour la pensée sur lesquels on peut très aisément faire de nombreuses opérations intellectuelles ; il est ainsi possible de penser des combinaisons qui se font et se défont avec des liaisons de nature différente (répulsives ou attractives, faibles ou fortes...) ; suivant l'image de Malrieu (2008), le modèle atomique en chimie est analogue à un « jeu de Lego moléculaire » ; il est à la fois très simple et potentiellement très puissant ; soulignons que si ce modèle est si aisé à manipuler intellectuellement, c'est notamment parce que les atomes et donc les molécules peuvent être représentés figurativement par des schémas simples (en deux ou trois dimensions) ; divers types de schématisation des molécules sont possibles ; celles-ci possèdent chacune une valeur heuristique pour traiter un aspect ou un autre des propriétés et des réactions chimiques (Hoffmann et Laszlo, 1991, Bensaude-Vincent & Simon, 2008) ;
- *Le modèle atomique peut être enrichi de multiples façons*: il est très flexible, c'est-à-dire qu'il peut facilement être enrichi ou modifié par de nouvelles hypothèses (ex : rôle des électrons dans les liaisons chimiques) et/ou par une structure mathématique (ex : fonction d'onde de la mécanique quantique associée aux électrons d'une molécule), et ce, pour intégrer ou s'adapter aux nouvelles connaissances empiriques ; de fait, le modèle atomique utilisé pour décrire et prédire les propriétés et les réactions chimiques a considérablement évolué au cours du XIXe et du XXe siècles, du modèle très simple et minimal de Dalton à celui très complexe et riche de la chimie quantique, en passant par celui de Lewis ; en outre, dans la chimie actuelle, les hypothèses précises constitutives du modèle atomique employé peuvent être adaptées en fonction des conditions expérimentales (Zeidler, 2000).

2.8 Pragmatisme, QBism et la question de l'intersubjectivité

Récemment, dans un article de synthèse, Healey (2017) présente et discute une famille d'interprétations de la mécanique quantique d'inspiration pragmatiste, qui selon lui regroupe le QBism développé par Fuchs, Schack et Mermin (Mermin, 2014, Fuchs & Schack, 2015, Fuchs, 2016, 2017), l'interprétation de Stapp (1972), l'interprétation nouvelle qu'il

défend actuellement (Healey, 2012), ainsi que l'interprétation pragmatiste que j'ai développée (Bächtold, 2008b, 2009). Outre des références explicites à la philosophie pragmatiste et en particulier à James, ces interprétations selon Healey partagent les idées suivantes : la mécanique quantique ne devrait pas être considérée comme offrant une représentation du monde physique ; en particulier, le vecteur d'état associé à un système en mécanique quantique ne devrait pas être interprété comme représentant l'état physique de ce système ; pour autant, ces interprétations ne sont pas subjectivistes ; la mécanique quantique, selon ces interprétations, est « objective non parce qu'elle reflète le monde physique, mais parce que chaque usage individuel de la théorie satisfait des standards objectifs reposant sur les connaissances et buts communs de la communauté scientifique ».

La lecture de cet article et ma participation à un workshop en 2017 au STIAS organisé par Chris Fuchs et Rüdiger Schack m'ont conduit à étudier plusieurs publications récentes sur le QBism et à chercher à identifier les points de convergence et de divergence entre cette interprétation et mon interprétation pragmatiste. Concernant le vecteur d'état, le QBism et l'interprétation pragmatiste rejettent effectivement tous deux l'idée selon laquelle il représenterait l'état physique du système considéré. Ainsi, tous deux évitent de se heurter au problème de la mesure. Cependant, en positif, le QBism interprète le vecteur d'état comme représentant l'état épistémique *d'un agent* concernant ses possibles futures expériences. Par contraste, l'interprétation pragmatiste voit le vecteur d'état comme un outil *partagé* (ou pouvant être partagé en principe) *par tous les scientifiques* permettant de remplir deux fonctions pragmatiques dans l'activité de recherche de ces scientifiques : (1) encapsuler de manière synthétique l'ensemble des informations associées à une certaine préparation et (2) déterminer de manière *a priori*, pour toute mesure pouvant être réalisée à la suite de cette préparation, l'ensemble de ses résultats possibles et la probabilité de leur survenue respective. Autrement dit, le QBism confine la mécanique quantique à la perspective subjective d'un agent, alors que l'interprétation pragmatiste ouvre la théorie à une perspective qui est d'emblée commune à l'ensemble des physiciens. Cette différence se retrouve dans l'interprétation des différents éléments de la théorie associés au vecteur d'état, en particulier les probabilités, la règle de Born et l'équation de Schrödinger. Selon le QBism, les probabilités dérivées du vecteur d'état sont interprétées de manière *subjective* comme traduisant un degré de croyance *d'un agent* concernant ses expériences futures ; la règle de Born est alors considérée comme une relation qui a une fonction normative, c'est-à-dire que l'agent doit appliquer pour garantir la consistance de ses probabilités ; de même, l'équation de Schrödinger joue le rôle d'une contrainte que l'agent doit imposer à l'évolution de ses probabilités. Selon l'interprétation pragmatiste, les probabilités, qui sont déterminées à partir du vecteur d'état et au moyen de la règle de Born et de l'équation de Schrödinger, constitue un outil de prédiction qui est en principe disponible *pour tous les physiciens*, dès lors que les conditions de l'expérience considérée leur sont connues.

Le programme de recherche du QBism explicité par Fuchs (2017) ressemble, dans une certaine mesure, à celui de l'interprétation pragmatiste : il consiste à « séparer le subjectif de l'objectif », c'est-à-dire à traquer dans la mécanique quantique tous les éléments subjectifs de sorte à pouvoir identifier dans la théorie un résidu objectif. Fuchs (2016, 2017) met en avant le résultat suivant : un élément objectif de la théorie peut être localisé possiblement dans la *relation* exprimée par la règle de Born telle qu'elle est formulée dans le cadre du QBism, c'est-à-dire en termes d'opérateurs représentant une observable idéale appelée SIC (Symmetric Informationally Complete), plutôt que dans les éléments qu'elle met en relation (les probabilités). Le terme « objectif » tel que l'emploie Fuchs est compris de

façon réaliste : un élément de la théorie est « objectif » s'il capture quelque chose du monde physique. Avant d'en venir au parallèle possible avec l'interprétation pragmatiste, je formulerais ici une objection : l'élément objectif supposé avoir été décelé dans la version QBiste de la règle de Born s'exprime *dans le cadre de la mécanique quantique*, autrement dit, il dépend d'une certaine construction théorique, laquelle ne relève pas du monde physique ; par conséquent, cet élément identifié dans la règle de Born apparaît encore hybride, comportant des faces objective et subjective difficilement dissociables. Paradoxalement, il semble qu'en intégrant dans la règle de Born la structure des espaces de Hilbert, Fuchs (2017, p. 18) y a injecté une dose subjective supplémentaire, rendant le supposé élément objectif encore plus dépendant du cadre théorique. À l'appui de cette objection, je convoquerais Quine (1977 [1960]) et Putnam (1984 [1981]), qui tous deux ont souligné l'impossibilité d'adopter un « point de vue de nul part » : toute référence à une supposée entité ou structure du monde physique s'inscrit toujours dans le cadre d'une certaine théorie, c'est-à-dire d'un certain découpage du monde par la pensée, et y est donc relatif ; toute forme de réalisme est nécessairement « interne » à une théorie.

Dans le cadre de mon interprétation pragmatiste, je ferais l'économie du terme « objectif ». En revanche, il me semble pertinent d'avoir comme but d'identifier ce qui dans la théorie correspond, non pas à un résidu objectif, mais à un résidu relevant d'une « contrainte empirique », et ce, suivant une démarche similaire à celle du QBism en procédant par élimination, c'est-à-dire en cernant ce qui, à l'inverse, relève des attentes *a priori* des scientifiques pour garantir le succès de leurs activités de recherche. Pour ma part, j'en suis venu à la conclusion qu'une telle contrainte empirique pouvait être localisée dans la *relation* d'incompatibilité entre certaines observables. Cette relation d'incompatibilité semble échapper à toute justification pragmatiste et s'imposer à la structure de la théorie. Elle renvoie à ce que Bohr avait pointé comme un élément nouveau et fondamental apporté par la mécanique quantique, à savoir l'impossibilité de mesurer simultanément avec une précision arbitrairement grande certaines paires d'observables en raison du caractère mutuellement exclusif des conditions expérimentales nécessaires à ces mesures.

Une question se pose concernant le parallèle entre le QBism et l'interprétation pragmatiste : quels liens entretiennent la relation exprimée par la règle de Born et la relation d'incompatibilité entre certaines observables ? À cet égard, Fuchs (2017, p. 17) souligne que la version QBiste de la règle de Born exprime une relation, en termes probabilistes, entre une observable SIC et toutes les autres observables possibles, avec lesquelles l'observable SIC est « complémentaire » au sens de Bohr, c'est-à-dire telle que le dispositif expérimental pour la mesurer est mutuellement exclusif de ceux pour mesurer toutes les autres observables. En d'autres termes, la version QBiste de la règle de Born intègre la relation d'incompatibilité. En un sens, le résidu supposé « objectif » du QBism peut se ramener au résidu empirique de l'approche pragmatiste.

La demande que m'a adressée Chris Fuchs pour ma contribution au workshop de 2017 au STIAS consistait à apporter un éclairage philosophique sur la question de l'intersubjectivité concernant la survenue d'un événement physique, en précisant la contribution de la philosophie pragmatiste. Cette question se trouve au centre de la principale objection adressée au QBism (Healey, 2017), mais aussi d'expériences de pensée récentes (Frauchiger & Renner, 2016) prolongeant celle dite de « l'ami de Wigner » (qui pointe la différence entre le vecteur d'état d'un observateur dans un laboratoire ayant constaté le résultat d'une mesure sur un système et le vecteur d'état d'un observateur se situant à l'extérieur de ce laboratoire). En quoi la question de l'accord intersubjectif est-elle problématique ? Pour les

événements physiques de la vie quotidienne, par exemple la chute d'une pomme à tel endroit et à tel instant, les réalistes scientifiques peuvent apporter une explication très simple : la chute de la pomme est un événement objectif (au sens réaliste) qui survient dans le monde en soi ; Chris et Rüdiger observent chacun cette même chute ; s'ils comparent ce qu'ils ont observé, leur accord sera assuré par le caractère objectif de la chute. En revanche, l'explication d'un tel accord pose problème pour toute approche anti-réaliste qui admet une dose de subjectivisme, en particulier pour le QBism : à supposer que Chris et Rüdiger construisent chacun leur propre représentation du monde sur la base de leurs expériences personnelles, pourquoi devraient-ils être d'accord sur la chute d'une pomme ? Si maintenant nous considérons des événements physiques dans le domaine de la microphysique, la situation devient problématique non seulement pour les anti-réalistes mais aussi pour les partisans du réalisme scientifique. Prenons l'exemple de la mesure du spin suivant une direction donnée sur tel électron et à tel instant. Si Chris et Rüdiger, chacun de leur côté, font cette même mesure (par exemple Chris avec une mesure directe sur cet électron et Rüdiger avec une mesure indirecte sur un autre électron avec lequel le premier électron a préalablement interagi), alors de fait ils obtiendront le même résultat, disons « up ». Comment expliquer l'accord intersubjectif sur l'occurrence du résultat « up » ? L'explication réaliste n'est plus tenable : la mécanique quantique nous interdit de supposer que le spin de l'électron suivant la direction considérée était « up » avant toute mesure.

Partant d'une première étude sur cette question publiée dans la revue de philosophie *Klésis* (Bächtold, 2013c) et à partir des écrits de Peirce, James, Dewey et Mead, j'ai tenté de dégager plusieurs éléments d'explication de l'accord intersubjectif. L'approche de Peirce en termes de convergence vers la vérité-consensus se distingue le plus des approches des autres philosophes pragmatistes et se heurte à des objections sérieuses. J'ai donc proposé de la mettre à l'écart. En revanche, j'ai tenté de montrer que les contributions de James, Dewey et Mead sont, dans une certaine mesure, complémentaires : conjointement, elles permettent d'apporter des éléments d'explication à la question de l'accord intersubjectif, et ce, pour des événements physiques de la vie quotidienne ou dans le domaine de la microphysique :

- D'après James deux interlocuteurs parviennent à un accord concernant un événement physique en agissant l'un sur l'autre de sorte à ce qu'ils se guident mutuellement (physiquement et/ou par les idées) vers des activités et des conséquences observables de ces activités qui sont partagées et qui permettent de constater ensemble le fait que l'événement en question est survenu. L'explication de James met l'accent sur l'action que deux interlocuteurs peuvent exercer l'un sur l'autre.
- Dewey et Mead apporte une explication similaire qui met l'accent, elle, sur les activités qui doivent être partagées. Selon eux, une condition pour garantir l'accord intersubjectif sur la survenue d'un événement physique est que les deux interlocuteurs s'accordent sur les types d'activités qui pourraient être réalisées pour constater le fait que cet événement est survenu et les types de conséquences de ces activités qui pourraient être observés.
- Cette dernière explication soulève un nouveau problème : qu'est-ce qui rend possible l'accord intersubjectif concernant ces activités ? Autrement dit, qu'est-ce qui garantit que les deux interlocuteurs ont effectivement en tête les mêmes activités, lesquelles sont supposées conduire au constat partagé de l'événement physique ? À cette question, Mead apporte la réponse suivante : ces activités ne *deviennent* pas

communes aux deux interlocuteurs, elles le sont *dès l'origine*, car elles prennent leur source dans une entreprise collective. Mead souligne le fait que les individus ne mènent pas d'abord des activités de façon autarciques avant de chercher à les partager ou à partager les conséquences de ces activités ; les individus sont pris d'emblée dans le jeu d'activités coopératives et ces activités coopératives sont possibles si chacun est capable d'adopter la perspective des autres et de comprendre leurs rôles respectifs.

James, Dewey et Mead nous conduisent à considérer la physique comme un ensemble d'activités collectives qui fonctionnent car elles s'appuient sur des éléments qui sont partagées par les scientifiques, en particulier des théories, des instruments et des méthodes. Ils offrent une piste intéressante pour expliquer la possibilité de l'accord intersubjectif. Je propose de résumer cette explication ainsi : (1) c'est parce que les scientifiques partagent des théories, des instruments et des méthodes (Dewey et Mead), et (2) qu'ils coopèrent et peuvent agir sur le cours des pensées et des actions des autres (James), qu'ils peuvent parvenir à un accord sur les événements physiques survenus.

L'élément d'explication de l'accord intersubjectif proposé par James se retrouve chez Mermin (2014), qui ne cite cependant pas James, lorsqu'il défend le QBism contre l'objection du solipsisme : « Les QBists sont souvent taxés de solipsistes : une croyance que le monde existe seulement dans l'esprit d'un seul agent. Ceci est faux. Bien que je ne puisse pas entrer dans votre esprit pour faire l'expérience de vos propres perceptions privées, vous pouvez affecter mes perceptions à travers le langage. Lorsque je converse avec vous et lit vos livres et articles dans *Nature*, il est plausible que je conclue que vous êtes un être qui perçoit plutôt comme moi, et que j'infère des aspects de votre expérience. C'est ainsi que nous pouvons arriver à une compréhension commune de nos mondes extérieurs, en dépit du caractère privé de nos expériences individuelles ». Dans un autre article, Mermin (2017) s'écarte de l'approche personnaliste de Fuchs et met en avant la dimension collective : « La science est un effort humain collectif pour trouver, à travers nos actions individuelles sur le monde et nos communications verbales les uns avec les autres, un modèle pour ce qui est commun à tous nos mondes extérieurs construits de façon privée ». Toutefois, dans une certaine mesure, cette description de la science diffère de l'approche pragmatiste inspirée de Dewey et Mead évoquée ci-dessus. Suivant cette approche, les scientifiques n'interagissent pas d'abord de manière isolée avec le monde physique et se construisent une représentation personnelle de ce monde, avant d'échanger et de chercher à se mettre d'accord ; la comparaison et la mise en commun n'interviennent pas après coup ; depuis leur enfance et tout au long de leur éducation, les scientifiques se construisent une représentation du monde physique, certes en interagissant avec ce monde, mais aussi en interagissant dès le début avec les autres, en baignant d'emblée dans une culture partagée et en particulier dans la culture scientifique.

On le voit, la question de l'intersubjectivité, qui fait actuellement l'objet de discussions en lien avec les fondements de la mécanique quantique, peut conduire vers une réflexion *épistémologique* sur les connaissances scientifiques (esquissée ci-dessus dans le cadre de la philosophie pragmatiste) et finalement vers une réflexion sur *l'apprentissage* de ces connaissances scientifiques. L'idée d'acculturation scientifique fait écho aux idées de Vygotski qui ont influencé le domaine de la didactique de la physique. J'y reviendrai dans la partie consacrée aux sources théoriques de l'enseignement par démarches d'investigation (section 4.1). La question de l'intersubjectivité permet également de jeter un pont avec un projet de recherche en cours décrit plus loin (partie 5) qui porte sur l'apprentissage de

l'argumentation au lycée sur des questions socio-scientifiques (QSS). En effet, ce projet aborde des questions liées à la multiplicité des perspectives qui peuvent s'articuler ou se confronter dans le cadre d'un débat concernant une QSS et à la recherche d'intercompréhension.

3. Histoire, épistémologie et enseignement du concept d'énergie

3.1 Programme de recherche sur l'enseignement de l'énergie

Entre 2006 et 2009, j'ai assuré plusieurs enseignements : comme chargé de cours en histoire et philosophie des sciences et en mécanique quantique au Centre d'Études Supérieures Industrielles (Bagneux) et à l'École de Biologie Industrielle (Cergy), puis également comme chargé d'enseignement et de recherche (wissenschaftlicher Mitarbeiter) à mi-temps en philosophie des sciences à la Technische Universität de Dortmund. À l'occasion de ces enseignements, j'ai pu entrevoir l'intérêt des recherches en épistémologie pour la question de l'enseignement des sciences : comprendre la genèse et le statut des connaissances en physique offre des clés à la fois pour penser la structuration des contenus scientifiques à enseigner et pour en discuter la signification avec les étudiants. C'est pourquoi, en 2009, j'ai porté une attention toute particulière à un poste de maître de conférences ouvert au recrutement à l'Université de Montpellier et intitulé « Epistémologie et didactique de la physique » (sections 28 et 72 du CNU). En profilant ce poste à l'interface de ces deux disciplines, l'équipe ERES du LIRDEF (EA3749, Université de Montpellier et UPVM), spécialisée en didactique des sciences et des mathématiques, a souhaité développer son ouverture vers les domaines de l'épistémologie et l'histoire des sciences.

Recruté sur ce poste, j'ai rapidement été intégré et impliqué dans les activités recherches de plusieurs membres de l'équipe ERES. J'ai ainsi pu bénéficier de leurs expériences de recherche en didactique des sciences et amorcer avec eux des travaux collaboratifs stimulants et riches. Depuis 2009, mon activité scientifique a d'abord été caractérisée par deux axes de recherche. Le premier porte sur l'histoire, l'épistémologie et la didactique de l'énergie, le second sur les liens entre démarches scientifiques et démarches d'investigation à l'école (voir partie 4). Depuis 2016, mes travaux de recherche s'inscrivent également dans un troisième axe de recherche, celui de l'argumentation sur des questions socio-scientifiques avec l'usage du numérique (voir partie 5).

Dans cette partie, je commencerai par présenter mes recherches sur l'énergie. Celles-ci ont été menées en collaboration avec des collègues de mon équipe de recherche, d'abord Muriel Guedj puis Valérie Munier, et des collègues extérieurs à celle-ci, Alain Lerouge et André Ranquet. À partir de 2015, je me suis également nourri d'interactions avec plusieurs chercheurs à l'étranger : Knut Neumann et Jeffrey Nordine à l'IPN de Kiel et Yaron Lehari à l'Institut Weizmann de Jérusalem. La démarche générale de ces recherches consiste à repenser les questions d'enseignement et d'apprentissage de l'énergie à la lumière de travaux en histoire et en épistémologie sur ce concept. Le programme de recherche mis en œuvre se compose de quatre étapes :

- *Étape 1* : de 2009 à 2012, nous avons exploré la littérature en didactique des sciences relative au concept d'énergie afin de cerner les enjeux éducatifs, identifier les difficultés d'apprentissage des élèves et faire l'état des lieux des stratégies didactiques proposées pour son enseignement de l'école primaire jusqu'au lycée (section 3.2) ;
- *Étape 2* : sur cette même période de 2009 à 2012, nous avons mené des travaux sur l'énergie dans le champ de l'épistémologie et de l'histoire des sciences afin de comprendre les raisons de l'introduction de ce concept dans la physique du milieu du XIXe siècle et de dégager sa signification ainsi que les fonctions qu'il permet de remplir, suivant une approche faisant écho à l'approche pragmatiste développée dans mes travaux antérieurs (partie 2) ; nous avons en particulier mis en lumière la fonction unificatrice de l'énergie dans le contexte d'une physique morcelée, ainsi

que l'importance du principe de conservation et le rôle de la définition de Rankine (section 3.3) ;

- *Étape 3* : nous avons ensuite analysé, de 2012 à 2014, les programmes et les manuels français actuels en les confrontant à la littérature en didactique des sciences et à l'éclairage de l'épistémologie et de l'histoire des sciences ; cette étude a permis d'alimenter la réflexion sur la question de la progression de l'enseignement de l'énergie tout au long de la scolarité ; j'ai prolongé cette étude sur le cas spécifique de la définition de l'énergie en m'appuyant de plus sur une analyse des pratiques enseignantes (par voie de questionnaire) (section 3.4) ;
- *Étape 4* : de 2013 à 2017, au sein d'un groupe de recherche que j'ai coordonné, nous avons élaboré et expérimenté de façon collaborative et itérative avec 3 puis 2 enseignants de Première S une nouvelle stratégie d'enseignement de l'énergie au lycée s'appuyant sur les travaux de didactique et d'épistémologie réalisés précédemment et un introduisant des éléments d'histoire des sciences (section 3.5).

3.2 L'enseignement de l'énergie : enjeux éducatifs et stratégies didactiques

Le concept d'énergie est très présent tout au long de la scolarité, du primaire jusqu'à la fin du secondaire, non seulement dans le cursus de physique, mais aussi dans celui d'autres disciplines comme la chimie, les sciences de la vie et de la Terre ou la géographie. L'importance accordée à ce concept dans les programmes scolaires se justifie par deux enjeux éducatifs distincts. Premièrement, l'énergie est un concept fondamental de la physique qui permet d'expliquer et de prédire les phénomènes dans toutes les branches de la physique. Le premier enjeu éducatif est donc d'aider les élèves à maîtriser progressivement ce concept sur le plan scientifique. Deuxièmement, l'énergie se trouve au centre de nombreuses questions socio-scientifiques liées au développement durable. Dans cette perspective, un second enjeu éducatif est de former les élèves, futurs citoyens, pour qu'ils puissent participer de façon constructive aux débats et aux décisions sur ces questions. À cet égard, il s'agit (i) de sensibiliser les élèves à la complexité et au caractère ouvert des questions socio-scientifiques, (ii) de leur faire acquérir des connaissances scientifiques pertinentes pour aborder ces questions de façon éclairée et (iii) de développer leur compétences argumentatives et leur esprit critique. Le projet de recherche décrit dans la partie 5 s'inscrit dans cette perspective d'éducation à la citoyenneté.

Une première étape de nos recherches sur l'enseignement de l'énergie a été d'identifier précisément les difficultés d'apprentissage de ce concept. Celles-ci sont exposées notamment dans un article publié dans la revue *RDST* (Bächtold, Munier, Guedj, Lerouge & Ranquet, 2004). Soulignons d'abord que le terme « énergie » est polysémique. Diverses significations lui sont attachées selon le domaine ou le contexte. Par exemple, le terme ne revêt pas la même signification en thermodynamique, en économie, dans la vie de tous les jours lorsque l'on parle de la forme physique d'une personne ou encore lorsque l'on aborde des questions sociétales portant sur les sources d'énergie, la production ou la consommation d'énergie. Certains auteurs parlent ainsi d'une « discontinuité abrupte dans le mode de pensée » (Solomon, 1983), voire de plusieurs « mondes » (Lijnse, 1990). En particulier, s'opposent le mode de pensée qui caractérise la physique (où l'énergie est décrite comme la propriété d'un système et comme une grandeur conservée) à celui qui caractérise les débats sur les questions socio-scientifiques liées à l'énergie (où l'on parle de cette dernière comme s'il s'agissait d'une substance quasi-matérielle qui pourrait être produite, stockée et

détruite). Confrontés à ces divers modes de pensée, les élèves se construisent une diversité de conceptions de l'énergie comme l'ont documenté plusieurs recherches empiriques (Watts, 1983, Trumper, 1993) : conception anthropologique (chez les plus jeunes : l'énergie associée uniquement aux êtres humains, voire aux animaux et non aux objets matériels inertes), conception substantialiste (énergie comme une sorte de carburant), énergie associée au mouvement, énergie associée à l'électricité, énergie comme une sorte de force... Il s'agit alors pour les élèves, d'une part, de s'émanciper de conceptions initiales erronées pour accéder au concept scientifique d'énergie, et d'autre part, d'apprendre à passer sans confusion entre les différents modes de pensée mobilisés en fonction du contexte. Seulement, pour que les élèves puissent s'émanciper de leurs conceptions initiales erronées de l'énergie, encore faudrait-il selon moi que les enseignants leur proposent en substitution une définition scientifique de l'énergie. Or, concernant une telle définition, les chercheurs en didactique des sciences ne sont pas parvenus à un consensus. Il existe certes une définition disponible, celle de Rankine en termes de la capacité d'un système à produire des changements. Mais celle-ci fait débat et, de fait, tous les enseignants n'en font pas usage dans leurs classes. Je reviendrai plus loin sur ce point (section 3.4).

Comme l'ont pointé plusieurs auteurs (Warren, 1982, Millar, 2005), le concept d'énergie est l'un des plus abstraits de la physique, ce qui n'est pas sans lien avec la question précédente de la définition de l'énergie. Si l'on admet la définition en termes de *capacité* à produire des changements, l'énergie désigne une propriété qui par nature est potentielle ou, autrement dit, qui doit être pensée en référence à des changements qui ne sont que virtuels (McIlldowie, 2004). Si l'on s'abstient de définir l'énergie, son caractère abstrait n'en est que plus grand : elle désigne alors simplement une quantité numérique qui est conservée (Feynman, 1963). La grandeur énergie est très abstraite également parce que sa mesure expérimentale est indirecte. Sa valeur ne peut être déterminée que par l'intermédiaire de la mesure d'autres grandeurs, comme celles de masse, de charge électrique, de vitesse (dans le cas d'un corps matériel), de fréquence (dans le cas d'un photon), et par suite de distance et de durée. Enfin, sous le concept d'énergie, nous subsumons, non pas un type particulier de phénomènes, mais une grande diversité de phénomènes qui en apparence n'ont que peu de liens (phénomènes mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, nucléaires...).

En outre, le concept d'énergie est très complexe au sens où il est imbriqué dans un réseau conceptuel très riche. D'une part, il est mobilisé explicitement par d'autres concepts : ceux de forme d'énergie (cinétique, potentielle, thermique...), de mode de transfert d'énergie (travail mécanique, travail électrique, transfert thermique...), de dissipation d'énergie, de source d'énergie (le Soleil, le pétrole, le vent...), etc. D'autre part, le concept d'énergie est étroitement relié à d'autres concepts de la physique, comme ceux de force, de puissance, de température, d'entropie, etc. Il s'agit, pour les élèves, d'apprendre à distinguer ces différents concepts, qui sont souvent confondus. C'est le cas en particulier de la force et de l'énergie (Watts, 1983, Trelu & Toussaint, 1986), de la chaleur et de la température (Lewis & Linn, 1994, Harrison et al., 1999), ou encore des formes d'énergie et des modes de transfert d'énergie – le travail et la chaleur étant parfois considérés à tort comme des formes d'énergie (Cotignola et al., 2002, Papadouris & Constantinou, 2011).

Par ailleurs, le concept d'énergie est indissociable du principe de conservation de l'énergie, dont l'apprentissage implique de nombreux prérequis (Lee & Liu, 2010, Neumann et al., 2013). En particulier, les élèves doivent maîtriser les phénomènes de transformation d'énergie, de transfert d'énergie d'un système à un autre et de dissipation d'énergie. Le système étudié doit être clairement identifié et distingué de l'environnement avec lequel il

peut échanger de l'énergie. Enfin, les élèves doivent avoir une certaine maîtrise sur le plan des outils mathématiques (pour déterminer quantitativement l'énergie transférée, le travail produit, la vitesse acquise, etc.). Ces nombreux prérequis expliquent qu'à la fin de la scolarité dans le secondaire, seule une minorité d'élèves est capable de mobiliser le principe et de l'appliquer correctement pour résoudre un problème (Duit, 1981, Driver & Warrington, 1985, Neumann et al., 2013).

Si l'étude de la littérature nous a permis de clarifier un ensemble de difficultés d'apprentissage de l'énergie, nos propres recherches empiriques (section 3.6) en ont mis en lumière deux nouvelles. Celles-ci ont été identifiées dans les réponses d'élèves de Première S à un questionnaire sur l'énergie soumis lors de la première année de notre expérimentation – les résultats de cette expérimentation étant présentés dans un article publié dans les actes du colloque *GIREP 2015* (Bächtold, Munier, Guedj, Lerouge & Ranquet, 2016). La première difficulté mise au jour peut se voir comme le prolongement de la confusion classique entre les grandeurs force et énergie. En effet, une partie des élèves font la confusion entre deux types de descriptions disponibles en physique pour expliquer et prédire les phénomènes : (1) celle en termes de forces qui agissent sur un système donné et d'effets de ces forces sur l'état de ce système et (2) celle en termes d'énergie qui peut être transformée et/ou transférée d'un système à un autre. La confusion peut être illustrée par l'extrait suivant dans lequel un élève cherche à expliquer la chute d'une pomme initialement accrochée à un arbre : « l'énergie de la terre attire la pomme ». La seconde difficulté identifiée concerne la notion de conservation : certains élèves font la confusion entre la conservation de l'énergie mécanique, qui est une propriété contingente (c'est-à-dire dépendant de la présence ou non de frottements) d'une forme spécifique d'énergie (à savoir l'énergie mécanique) et la conservation de l'énergie, qui est admise en physique comme une propriété universelle de cette grandeur. Cette confusion conduit certains élèves à penser que le principe de conservation peut ne pas être valide dans certaines situations.

Au regard de ces multiples difficultés, la question de l'enseignement de l'énergie apparaît comme un réel défi. Plus précisément, le défi est de mettre au point une stratégie d'enseignement permettant aux élèves de développer un réseau conceptuel associé à l'énergie qui soit progressivement toujours plus complexe et différencié et qui, à terme, les conduise à une maîtrise suffisante du principe de conservation de l'énergie. La conservation, en effet, est largement admise comme une propriété essentielle de l'énergie (voir la section suivante) et le principe de conservation comme un instrument théorique puissant pour décrire et prédire *quantitativement* tous types de processus physiques. Dans le cadre de nos recherches, nous en sommes également venus à considérer qu'un autre défi est d'aider les élèves à s'approprier pleinement la notion de transformation d'énergie, ce que nous mettons en avant dans un article accepté récemment par la revue *Journal of Research in Science Teaching* (Bächtold & Munier, accepté). L'usage de cette notion en classe ne fait pas entièrement consensus. Certains auteurs estiment que parler de « formes » et de « transformations » d'énergie prête à confusion, parce cela pourrait aller à l'encontre de l'idée que l'énergie est une « quantité unitaire » (Brewer, 2011) qui « en soi ne change pas » (Falk et al., 1983). Cependant, une solution revient pour les enseignants à faire usage de ces termes, tout en soulignant que les différentes formes d'énergie sont les manifestations possibles d'une unique quantité. Selon nous, il existe plusieurs raisons qui justifient de placer la notion de transformation au cœur de l'enseignement de l'énergie. Premièrement, cette notion est requise pour une application correcte du principe de conservation de l'énergie. Deuxièmement, elle constitue en elle-même un instrument théorique puissant pour décrire

qualitativement tous types de processus physiques, en particulier les phénomènes de la vie quotidienne, comme l'ont souligné plusieurs auteurs (Nordine et al., 2010, Lacy et al., 2014). Troisièmement, dans le cadre du traitement de questions socio-scientifiques liées à l'énergie, maîtriser les notions non seulement de conservation (et corrélativement, de dissipation et de distinction système/environnement) mais aussi de transformation d'énergie apparaît utile pour éviter une mauvaise interprétation des expressions usuelles dans ce contexte telles que « production d'énergie », « consommation d'énergie », ou encore « perte d'énergie » (ces expressions correspondant en réalité toujours à des transformations d'énergie, sans création ni disparition dans l'absolu).

S'agissant des défis propres à l'éducation au développement durable lié à l'énergie, ils sont multiples. Nous reviendrons sur ceux liés à l'argumentation et à l'esprit critique dans la partie 5. Évoquons ici ceux qui concernent les connaissances scientifiques que les élèves devraient maîtriser pour pouvoir traiter ces questions de façon éclairée du point de vue scientifique. À ma connaissance, l'identification de ces connaissances scientifiques n'a pas fait l'objet d'études spécifiques. Si l'on explore des articles de presse portant liées à de telles questions (comme nous l'avons fait pour préparer l'expérimentation en classe en Première S d'une activité de cartographie d'une controverse autour des centrales nucléaires, expérimentation qui n'a pas fait l'objet d'une étude publiée), on se rend compte que les connaissances scientifiques requises sont en réalité limitées : (i) comme indiqué ci-dessus, il semble important de savoir traduire correctement en termes scientifiques des expressions telles que « produire/consommer/économiser... » l'énergie, (ii) il semble également nécessaire de ne pas confondre les grandeurs énergie et puissance et les unités associées (en particulier, Wh et W) sous peine de faire des erreurs dans la manipulations des chiffres concernant la « production » et la « consommation » d'énergie dans nos sociétés, (iii) enfin, lorsqu'il est question des différentes sources d'énergie (sujet important dans ce contexte), il apparaît utile de savoir différencier correctement ces sources des formes d'énergie, le langage étant assez trompeur à cet égard (par exemple, l'« énergie solaire » ou l'« énergie éolienne » désignent non pas des formes mais des sources d'énergie). Autrement dit, en matière de connaissances scientifiques, les objectifs de l'éducation au développement durable lié à l'énergie apparaissent relativement modestes.

Ayant précisé les défis à relever, tournons-nous à présent vers les stratégies d'enseignement de l'énergie qui ont été proposées dans la littérature. En voici un panorama d'ensemble suivant l'exposé figurant dans l'article mentionné plus haut (Bächtold, Munier, Guedj, Lerouge & Ranquet, 2004).

Par-delà la diversité des stratégies proposées dans la littérature, plusieurs points font consensus. En particulier, tous les auteurs s'accordent sur l'idée que l'enseignement de l'énergie doit débiter au primaire par une approche qualitative, comme le suggèrent par exemple Millar (2005), Kaper & Goedhart (2002) ou Colonnese et al. (2012). À cette approche qualitative doit se substituer ensuite dans le secondaire une approche quantitative associée au principe de conservation de l'énergie, lequel est communément considéré comme le point d'aboutissement de l'enseignement de l'énergie (Lee & Liu, 2010, Neumann et al., 2013). Les chercheurs en didactique des sciences prennent ainsi acte de l'idée mise en avant par les épistémologues et historiens des sciences selon laquelle le concept d'énergie tel qu'il est compris et utilisé aujourd'hui en physique est intimement lié à celui du principe de conservation de l'énergie (voir section suivante).

Un autre point qui semble consensuel est le faisceau de concepts liés à l'énergie que les élèves doivent s'approprier pour pouvoir aborder le principe de conservation. Les différents auteurs s'accordent sur plusieurs « aspects » de l'énergie, qu'on peut considérer comme des « ingrédients » essentiels et qu'un enseignement cohérent de l'énergie se doit d'intégrer progressivement : les sources et les formes d'énergie, les notions de transformation, de transfert, de dissipation et de conservation de l'énergie. Ces différentes étapes sont pointées et détaillées notamment par Lee & Liu (2010) et Neumann et al. (2013).

Cependant, les auteurs ne mettent pas tous l'accent sur les mêmes aspects. Certains considèrent qu'on ne peut admettre la validité du principe de conservation sans comprendre le phénomène de dissipation – les expériences effectives de transformations ou de transferts d'énergie apparaissant comme étant non conservatives si la dissipation n'est pas mobilisée (Duit, 1984, Solomon, 1985, Goldring & Osborne, 1994).

D'après d'autres auteurs, il est également très important pour comprendre ce principe d'identifier correctement le système étudié et de le distinguer de l'environnement avec lequel il échange ou non de l'énergie (Trellu & Toussaint, 1986, Arons, 1999, van Huis & van den Berg, 1993).

Plusieurs auteurs préconisent une entrée par les transformations d'énergie, et ce, dès le primaire ou au début du secondaire (Nordine et al. 2010, Lee & Liu, 2010, Colonnese et al. 2012). Comme évoqué ci-dessus, cette notion de transformation peut facilement être utilisée pour décrire des phénomènes non idéalisés qui sont observables par les élèves dans leur vie quotidienne (Nordine et al. 2010). Dans le cadre de cette stratégie *via* les transformations, on peut identifier plusieurs variantes : aborder les transformations de l'énergie sans d'emblée définir le système (Lee et Liu, 2010) ou introduire simultanément les notions de transformation et de système afin d'être en adéquation avec la conception scientifique qui sera enseignée dans le secondaire (Colonnese et al. 2012).

D'autres suggèrent de commencer l'enseignement de l'énergie par les transferts d'énergie plutôt que par les transformations (Ellse, 1988, Vince & Tiberghien, 2012). Cette entrée par les transferts est censée éviter l'écueil évoqué plus haut d'une interprétation erronée des expressions « formes » et « transformations » d'énergie (Falk et al., 1983, Brewé, 2011). Récemment, certains chercheurs (Fortus et al., 2017) ont développé une stratégie pour l'enseignement dans le secondaire qui fait reposer l'explication de tous les processus physiques sur les notions de système, de transfert et de champ.

Un autre point fait également débat. Certains auteurs (Duit, 1987, Millar, 2005, Brewé, 2011) proposent de débiter l'enseignement de l'énergie en faisant une analogie entre l'énergie et la matière, c'est-à-dire en présentant l'énergie *comme* une « substance quasi-matérielle ». Duit (1987) notamment considère qu'une telle analogie constitue une aide à l'apprentissage de l'énergie, dans la mesure où elle rend ce concept plus « concret » ou plus « tangible ». D'après Millar (2005), elle permet en particulier de concevoir que l'énergie puisse être « stockée » ou « transférée » d'un endroit à un autre. Cette stratégie se trouve en rupture avec le point de vue d'auteurs (Warren 1982), pour qui un enseignement rigoureux de l'énergie doit nécessairement faire appel à la grandeur *travail*, dont la maîtrise n'est pas à la portée des élèves du primaire voire des premières années du secondaire. D'autres s'opposent aussi à cette approche et font du dépassement de la conception substantialiste un objectif dès l'école primaire (Colonnese et al. 2012). Il convient d'après ces auteurs de présenter d'emblée l'énergie comme étant la « propriété d'un système ».

Les diverses stratégies présentées ci-dessus portent principalement sur le choix et l'ordre des ingrédients ou des aspects de l'énergie qu'il s'agit de mettre en avant dans l'enseignement. D'autres stratégies se caractérisent par l'adoption d'une certaine théorie de l'enseignement et de l'apprentissage. À l'instar de nombreux sujets, le concept d'énergie a fait l'objet de propositions s'inscrivant dans le courant des approches dites « constructivistes » (concernant ce courant, voir la partie 4). Ainsi Trumper (1990, 1991, 1993) a développé une stratégie constructiviste consistant à faire émerger les conceptions des élèves et conduire ces derniers à identifier les conflits entre leurs conceptions et les propriétés de l'énergie impliquées dans le principe de conservation. De façon similaire, Agabra (1986) ainsi que Trelu et Toussaint (1986) ont repris l'idée d'« objectif-obstacle » de Martinand (1986) en proposant un enseignement de l'énergie piloté par des objectifs de dépassement d'obstacles associés à des conceptions erronées d'élèves. Toujours dans un cadre de pensée constructiviste, Lemeignan et Weil-Barais (1993), puis Robardet et Guillaud (1995), ont préconisé un enseignement permettant aux élèves de construire le concept d'énergie et sa conservation d'abord au niveau conceptuel, en établissant des relations « sémantiques » entre les systèmes étudiés (ex : un alternateur et une lampe), avant d'introduire le formalisme mathématique. C'est dans cette perspective que des propositions d'activités ont été faites consistant à faire construire aux élèves des « chaînes énergétiques ».

Enfin, plusieurs auteurs ont développé des stratégies d'enseignement de l'énergie qui s'appuient sur l'histoire des sciences et l'épistémologie (de Berg, 1997, Coelho, 2009, 2014, Cotignola, et al., 2002, Papadouris & Constantinou, 2011, 2016, Rizaki & Kokkotas, 2013). C'est cette approche que nous avons privilégiée dans nos recherches. Dans la ligne de ces auteurs, nous faisons l'hypothèse que l'histoire des sciences et l'épistémologie peuvent être utiles :

- Aux chercheurs en didactique des sciences : pour mieux comprendre la signification de l'énergie et son rôle en physique et, ce faisant, pour nourrir la réflexion sur la construction d'une stratégie d'enseignement qui soit pertinente ;
- Aux enseignants : également pour mieux comprendre la signification de l'énergie et son rôle en physique et, ce faisant, pour améliorer leurs compétences pour enseigner l'énergie ;
- Aux élèves dans les classes : pour les aider à mieux cerner certaines idées essentielles concernant l'énergie.

3.3 Éclairages historiques et épistémologiques sur le concept d'énergie

Partant de cette hypothèse, nous avons exploré un ensemble de sources primaires et secondaires en histoire des sciences et en épistémologie concernant l'énergie. Cette étude nous a permis d'identifier plusieurs éléments clés concernant la signification et le rôle du concept en physique. Nous avons organisé ces éléments autour de trois questions avec une double visée : faciliter l'exploitation de ces éléments pour élaborer une stratégie d'enseignement de l'énergie (voir section 3.6) et proposer une structuration des contenus pour un potentiel programme de formation sur l'énergie à destination des enseignants. Les trois questions qui font sens dans une perspective pragmatiste sont les suivantes :

- (1) Quelle est l'origine du concept d'énergie ?
- (2) Qu'est-ce que l'énergie ?

(3) Quelles sont les fonctions de l'énergie ?

Dans ce qui suit, je vais exposer les principaux éléments historiques et épistémologiques que nous avons identifiés concernant chacune de ces trois questions, en reprenant de façon plus concise la présentation développée dans un chapitre du *International handbook of research in history, philosophy and science teaching*, coordonné par Michael Matthews (Bächtold & Guedj, 2014).

Quelle est l'origine du concept d'énergie ?

Le fait que le concept d'énergie soit aujourd'hui omniprésent en physique et dans les autres sciences rend difficilement concevable qu'il ne faisait pas encore pleinement partie de l'arsenal de la physique il y a seulement 200 ans. Pour quelle raison et de quelle manière ce concept a-t-il été introduit en physique ? Autrement dit, quelle est précisément l'origine de ce concept ? Un premier point est à mettre en avant :

Dans son acception scientifique, le concept d'énergie est indissociable du principe de sa conservation tel qu'il a été formulé au milieu du XIXe siècle.

Ce point a été souligné notamment par Balibar (2010) : « le concept d'énergie n'est devenu un concept de la physique qu'à partir du moment où a été établi de façon irréversible qu'il existait une loi de conservation de l'énergie ». Ce point oriente la suite de notre propos, puisque qu'il conduit à recentrer l'étude sur la question « Quelle est l'origine du *principe de la conservation de l'énergie* ? ». Cette question peut être abordée selon deux perspectives complémentaires : celle centrée sur les acteurs qui ont participé à l'émergence du principe de la conservation de l'énergie et celle centrée sur les composantes épistémiques qui sont intervenues dans cette émergence.

S'agissant de la première perspective, l'histoire de l'énergie témoigne de l'importance des interactions entre les scientifiques, ou autrement dit, du fait que les avancées en sciences résultent de pratiques collectives :

Le principe de la conservation de l'énergie a émergé à la suite de différents travaux menés au milieu du XIXe siècle par plusieurs scientifiques (entre autres, par Mayer, Joule et Helmholtz) sous l'influence des contextes scientifique, technique, philosophique et religieux.

Le caractère collectif de cet épisode de l'histoire des sciences a été souligné par Kuhn (1959) qui recense pas moins de douze scientifiques ayant participé « simultanément » à la « découverte » du principe. S'agissant de l'expression « découverte » utilisée par Kuhn, il nous semble plus convenable de la substituer par celle d'« émergence » afin de ne pas suggérer l'idée que le principe aurait préexisté aux recherches scientifiques et aurait été dévoilé par celles-ci. Il convient selon nous de ne pas occulter l'activité de construction et d'invention menée par les scientifiques : avant que les scientifiques aient inclus l'énergie dans leur description du monde physique, ils ont d'abord dû en construire et stabiliser le concept.

En outre, cette construction ne s'est pas faite d'un coup, mais a été progressive. À cet égard, indiquons qu'au XVIIIe siècle, des précurseurs du principe de la conservation de l'énergie (ex : Leibniz, Huygens, Bernouilli, Lagrange...) ont posé les premiers jalons de cette construction dans le domaine de la mécanique : en forgeant et développant les concepts de *vis viva* et *vis mortua* (les ancêtres de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle) et en établissant, au milieu de ce siècle, ce que nous nommons aujourd'hui la conservation de l'énergie mécanique, cas particulier du principe tel qu'il a été énoncé 100 ans plus tard (cf.

Hiebert, 1981). Ajoutons que, au milieu du XIXe siècle, les scientifiques ayant contribué à l'émergence du principe « ne disaient pas les mêmes choses » (Kuhn, 1959), ou comme le remarque Elkana (1974), ont apporté des solutions à des « problèmes différents ». Ce n'est que progressivement, au cours des années 1850, que les différentes grandeurs de *vis viva*, travail, chaleur, etc. ont été identifiées comme des instances d'une même grandeur, à savoir l'énergie, et que les idées nouvelles soutenues par ces scientifiques ont été reconnues comme équivalentes et mettant en évidence la conservation de cette grandeur (Elkana, 1974, Guedj, 2010).

Enfin, l'émergence du principe peut difficilement être comprise indépendamment des contextes scientifique, technique, philosophique et religieux. Les éléments déterminants du contexte scientifique sont à la fois de nature théorique et expérimentale. Sans chercher l'exhaustivité de l'historien des sciences, retenons ici les éléments les plus significatifs. Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, la conservation de l'énergie mécanique a été admise de façon consensuelle vers le milieu du XVIIIe siècle. Néanmoins, l'établissement de cette conservation s'appuyait avant tout sur des considérations théoriques. Sur le plan expérimental, les scientifiques faisaient face au phénomène de l'apparente disparition partielle de la *vis viva* lors de collisions inélastiques. Comme l'explique Hiebert (1981), les scientifiques n'imaginaient pas qu'une partie de la *vis viva* puisse simplement disparaître et se sont mis à chercher ce qu'il advenait de la quantité manquante. Ce n'est que dans la première moitié du XIXe siècle qu'il est devenu manifeste que la *vis viva* pouvait se convertir en chaleur (nous parlons aujourd'hui du processus de transformation d'énergie cinétique en énergie thermique). Durant cette période, de nombreux autres processus de conversion ont été mis en évidence expérimentalement établissant ainsi des relations entre des domaines différents (sciences de la chaleur, mécanique, chimie, électricité, magnétisme, physiologie animale...). Or la « disponibilité des processus de conversion », comme l'écrit Kuhn (1959), apparaît comme une condition nécessaire à l'émergence du principe de la conservation de l'énergie. Le contexte technique a lui aussi exercé une influence majeure. L'essor des machines à vapeur et des machines électriques a beaucoup joué pour les développements théoriques de la première partie du XIXe siècle. Donnons un exemple : le concept scientifique de travail, indispensable dans la formulation du principe, a été élaboré par les scientifiques à partir de l'expérience accumulée dans le domaine du génie mécanique (Elkana, 1974, Vatin, 2010). Enfin, l'influence du contexte philosophique et religieux, bien que plus complexe à capter, est également mise en avant par tous les historiens des sciences. L'idée métaphysique, souvent associée à une conception religieuse, de l'égalité de la cause et de l'effet, telle qu'elle a notamment été formulée par Leibniz, était partagée par bon nombre d'acteurs de l'émergence du principe (ex : Mayer et Helmholtz) et les a motivé à rechercher une grandeur physique conservée (Mach, 1987 [1883], Meyerson, 1908, Kuhn, 1959).

Considérons la seconde perspective, centrée sur les composantes épistémiques que sont l'expérience et la raison. La question de l'origine du principe pourrait se poser sous forme de deux alternatives : (i) ce principe est-il une loi empirique (ou loi *a posteriori*) issue d'une investigation expérimentale ou, au contraire, (ii) est-il un principe métaphysique (ou principe *a priori*) établi par la raison ? D'après Meyerson (1908), l'histoire du principe montre que ni l'une ni l'autre de ces alternatives n'est « conforme à la vérité historique ». L'expérience et la raison semblent avoir contribué conjointement à l'établissement du principe. Cet épisode historique constitue ainsi un exemple en faveur de l'épistémologie développée par Kant, qui

visé à intégrer et à dépasser l'empirisme humien et le rationalisme cartésien. Formulons ce point de façon plus précise :

Le principe de la conservation de l'énergie est le résultat d'un ajustement mutuel entre une attente a priori des scientifiques, celle de trouver une grandeur se conservant lors de toute transformation, et l'expérience, qui a permis d'identifier une telle grandeur.

Nous inspirant de Meyerson (1908, pp. 175-190), nous proposons d'examiner l'alternative (i) à la lumière des expériences de Joule, puis celle (ii) à la lumière du principe de l'égalité de la cause et de l'effet. Dans un article de 1847, Joule affirme avoir établi sur la base de multiples expériences que la force vive (*living force* ou *vis viva*) peut se convertir en chaleur et inversement que la chaleur peut se convertir en force vive, sans que rien ne soit perdu lors de ces deux conversions (Joule, 1847a). Cette idée de convertibilité mutuelle sans perte n'est pas strictement équivalente au principe de la conservation de l'énergie, mais constitue une étape importante vers celui-ci : il convient encore d'admettre que la force vive et la chaleur sont deux instances d'une même grandeur, l'énergie, et de généraliser le cas particulier de la convertibilité mutuelle sans perte entre force vive et chaleur à toutes les conversions possibles entre les différentes formes d'énergie. Deux expériences réalisées par Joule dans les années 1840 permettent d'illustrer cette convertibilité mutuelle : l'expérience dans laquelle la chute d'une masse met en rotation des palettes dans un liquide et par l'effet des frottements provoque l'élévation de la température de ce liquide (ce qui met en évidence la conversion de force vive en chaleur ; nous reviendrons sur cette expérience plus loin) et l'expérience de la dilatation de l'air chauffée (qui met en évidence la conversion inverse). La limite de ces expériences est qu'elles ne permettent pas de garantir l'absence de perte lors de chacune des conversions. Pour ce faire, la première expérience devrait établir qu'une quantité A donnée de force vive donne toujours exactement une même quantité B de chaleur, tandis que la seconde expérience devrait établir que la quantité B de chaleur donne toujours exactement la même quantité A de force vive. Or, s'agissant de la première expérience, les résultats étaient entachés d'une grande dispersion (Truesdell, 1980). Dans le cas de la seconde expérience, le problème était beaucoup plus sérieux encore : comme W. Thomson le soulignera dans un article de 1852, la « restauration » de chaleur en force vive (Thomson parle d'« énergie mécanique ») est en pratique « impossible » en raison du phénomène de « dissipation » de l'énergie. Cet examen du cas de Joule suggère le rejet de l'alternative (i) : historiquement, le principe de la conservation de l'énergie n'a pas été tiré directement de l'expérience.

Étudions l'alternative (ii) selon laquelle ce principe serait établi par la raison de manière *a priori*. Comme indiqué plus haut, plusieurs scientifiques ayant contribué à l'émergence du principe, dont Mayer et Helmholtz présentent le principe de la conservation de l'énergie comme une conséquence du principe de l'égalité de la cause et de l'effet. Ce dernier peut certes être interprété en termes de la conservation d'une grandeur dans une relation de cause à effet (une grandeur qui s'instancie d'abord dans la cause, puis dans l'effet), mais ne détermine pas quelle est cette grandeur conservée. De fait, l'histoire des sciences témoigne du long tâtonnement des scientifiques à identifier cette grandeur : au XVII^e siècle, Descartes pensait qu'il s'agissait de la quantité de mouvement ; à la même époque, Leibniz proposa celle de *vis viva* ; tout au long du XVIII^e siècle, ce sera la proposition de Leibniz qui aura la préférence des scientifiques ; à partir de la seconde partie du XVIII^e siècle, Lavoisier avança la notion de calorique, substance elle aussi supposée se conserver et décrivant la chaleur ; c'est finalement au milieu du XIX^e siècle que l'énergie, conçue comme une grandeur plus

générale pouvant prendre diverses formes dont celle de la *vis viva* et de la chaleur, fut admise comme la grandeur conservée. Autrement dit, il y a bien chez les scientifiques l'idée *a priori* qu'il existe une grandeur qui se conserve lors de toute transformation, mais l'énergie n'a pas pu être identifiée comme la grandeur recherchée sans l'aide de l'expérience, et en particulier sans les multiples conversions mises en évidence dans la première moitié du XIXe siècle.

Qu'est-ce que l'énergie ?

Tournons-nous à présent vers la question « Qu'est-ce l'énergie ? ». Cette question est loin d'être évidente. De fait, s'il y a bien une définition disponible, celle proposée par Rankine (voir plus loin), celle-ci ne fait pas consensus. Si l'on fait l'économie de cette définition, il ne reste alors qu'une définition minimale consistant à décrire l'énergie comme une quantité qui se conserve. C'est ainsi que Poincaré (1968 [1902]) soutient : « Comme nous ne pouvons pas donner de l'énergie une définition générale, le principe de la conservation de l'énergie signifie simplement qu'il y a *quelque chose* qui demeure constant ». De même, Feynman (1963) écrit que « actuellement en physique, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie » et met en avant le principe de conservation qu'il décrit comme étant essentiellement « mathématique » : sachant que l'on peut quantifier/mesurer les énergies, la somme de toutes les énergies d'un système isolé est mathématiquement constante.

Cependant, comme je l'ai souligné dans un autre article publié dans la revue *Research in Science Education* (Bächtold, 2017), la conservation est une propriété qui n'est pas suffisante pour définir l'énergie et la différencier d'autres grandeurs. Par exemple, la quantité de mouvement et le moment cinétique sont également des grandeurs conservées. Or, il existe un moyen pour différencier l'énergie de ces autres grandeurs conservées qui consiste à mettre en lumière l'ensemble de ses caractéristiques (nous en distinguons huit principales) et à les articuler les unes aux autres (en particulier, certaines de ces caractéristiques permettant d'éclairer le principe de la conservation). À cet égard, l'histoire et l'épistémologie du concept d'énergie apportent des éclairages précieux.

La première caractéristique est la suivante :

(1) *L'énergie est une grandeur associée à un système.*

Autrement dit, l'énergie n'a pas d'existence autonome, indépendante de tout système. Ou comme l'écrit Bunge (2000) : « toute énergie est l'énergie de quelque chose ». Cette caractéristique n'a été clarifiée que progressivement au cours du XIXe siècle. S'appuyant sur Planck (1887), Duit (1987) pointe le fait que certains physiciens se sont d'abord appuyés sur une conception substantialiste de l'énergie en la considérant comme étant « quasi-matérielle » ; plus précisément, ils ont appréhendé la conservation de l'énergie en faisant une analogie avec la conservation de la matière. Admettant une telle conception substantialiste, certains scientifiques tels que Ostwald (1910) en sont venus à réifier l'énergie, à lui accorder une primauté ontologique et à réduire la matière à une manifestation de celle-ci. Il s'agit de la conception « énergétiste » aujourd'hui considérée comme obsolète. Un moyen de remettre en cause la conception substantialiste revient à mettre en avant le fait que l'énergie peut prendre des valeurs négatives, ce qui est liée à la relativité de la valeur de l'énergie à l'égard du choix de l'origine du système de coordonnées (Hertz, 1894). Si, dans la physique actuelle, l'énergie est considérée comme associée à un système, ce dernier ne joue pas simplement le rôle d'un réservoir d'énergie (*the depository model*, Watts, 1983) : comme le souligne Millar (2005), l'énergie n'est pas *dans* un système, elle n'est pas « contenue » ou « stockée » dans celui-ci ; l'énergie est la propriété d'un système.

Précisons que l'énergie n'est pas une propriété contingente, c'est-à-dire qu'un système peut avoir ou non en fonction du contexte.

(2) L'énergie est une grandeur universelle : elle est associée à tout système et dans tous les domaines des sciences.

Comme l'écrit Bunge (2000) : « l'énergie est la propriété universelle de la physique ». Cet auteur restreint cependant le champ d'application de cette propriété aux seuls objets matériels. Or, il importe de souligner que l'énergie est également une grandeur qui est associée à tout rayonnement électromagnétique, autrement dit, à des systèmes qui ne sont pas matériels. Mais ce qui confère véritablement à cette grandeur un caractère universel est qu'elle s'applique aux systèmes étudiés dans toutes les branches de la physique et plus largement dans tous les domaines des sciences empiriques (en chimie, biologie, géologie, en physiologie, etc.). Concernant cette universalité, l'histoire des sciences montre que les scientifiques n'ont pas d'abord identifié l'énergie dans une branche particulière de la physique, puis découvert peu à peu que cette grandeur était aussi associée aux systèmes étudiés dans les autres branches de la physique, ainsi que dans les autres domaines des sciences ; au contraire, c'est le rapprochement entre des branches différentes de la physique et des domaines différents des sciences empiriques (en particulier : sciences de la chaleur, mécanique et physiologie) qui a conduit à l'émergence du concept d'énergie (Kuhn, 1959). Ce point peut être mis en rapport avec la question du caractère abstrait du concept d'énergie, lequel peut se voir en positif : c'est parce que ce concept est très abstrait qu'il permet de subsumer toutes les formes d'énergie (définies dans les différentes branches de la physique) et qu'il a une portée universelle ; autrement dit, c'est par un processus d'abstraction à partir des phénomènes concrets dans chaque branche de la physique et domaine des sciences que le concept d'énergie s'est constitué.

Dire que l'énergie est une grandeur associée à un système est une caractérisation encore très pauvre de l'énergie et ne permet ni de la distinguer des autres grandeurs, ni d'en saisir la signification. À ce propos, la définition de Rankine (1855) apparaît décisive :

(3) L'énergie d'un système est sa capacité à produire des changements (dans le système ou dans d'autres).

Il importe d'introduire cette définition, non seulement parce qu'elle permet de clarifier la signification physique du concept d'énergie et de la distinguer ainsi des autres grandeurs physiques, mais également parce qu'elle est indispensable pour penser les autres caractéristiques de l'énergie que je vais présenter plus loin (i.e., l'énergie peut prendre plusieurs formes, changer de forme, être transférée, dissipée et conservée). Plusieurs objections ont été adressées à l'encontre de cette définition. Cependant, comme j'ai tenté de le montrer dans un article consacré à la définition de l'énergie (Bächtold, 2017), il est possible d'y répondre. Voyons ici les deux principales objections, qui concernent la définition de Rankine en termes de capacité d'un système à produire du « travail ». Sexl (1981), Duit (1981) et Trumper (1991) ont soutenu que cette définition est réfutée par la seconde loi de la thermodynamique, en invoquant que l'énergie interne d'un système ne peut pas être transformée entièrement en travail. En quoi cette idée constitue-t-elle une objection ? Pour le voir, il convient de prolonger le raisonnement ainsi : si l'énergie d'un système ne peut pas être transformée entièrement en travail, la valeur de cette énergie n'est pas égale au travail que ce système peut effectivement produire. Warren (1982) et Hobson (2004) ont très justement répondu que la définition de Rankine n'affirme pas que, *dans toutes les conditions*, la quantité totale de l'énergie d'un système peut être utilisée pour produire du

travail. En particulier, c'est impossible dans le cas de processus cycliques. Cependant, cette définition signifie que, conformément au second principe, il est toujours possible d'imaginer des *conditions idéales* pour lesquelles c'est possible. Une seconde objection a été formulée par Duit (1981, 2014) concernant la portée de la définition de Rankine : en faisant référence au travail, c'est-à-dire à des effets mécaniques, celle-ci a une portée qui est limitée au domaine de la mécanique et n'est donc pas universelle. Une première réponse revient à pointer que tout effet, mécanique ou non, peut en principe être converti physiquement en travail, de sorte que sa valeur peut être exprimée en termes de travail. D'ailleurs, si Rankine a défini l'énergie en termes de travail c'est bien pour pouvoir mesurer tous les effets que peut produire un système par rapport à une même grandeur de référence. Une seconde réponse possible consiste à modifier la formulation de la définition ainsi : l'énergie est la capacité d'un système à produire des « effets » ou des « changements ». Telle est d'ailleurs la formulation proposée ci-dessus en (3). À noter que Rankine a d'abord lui-même exprimé l'énergie en termes de « changement » et donc avec une portée universelle, avant d'en chercher une définition plus opératoire permettant d'avoir une mesure de l'énergie. Sur le plan scientifique, la définition de Rankine apparaît donc comme une définition tout à fait acceptable.

L'utilité, voire la nécessité, de s'appuyer sur cette définition peut être mise en lumière par un élément de l'histoire des sciences. L'identification dans les années 1850 des différentes grandeurs de force vive, travail, chaleur,... , comme des instances de l'énergie alors reconnue comme étant la grandeur conservée est concomitante de l'introduction par Rankine de la définition de l'énergie comme la capacité à produire des changements ou du travail (précisant ainsi une idée avancée peu avant par son collègue W. Thomson, 1951). Cette concomitance semble indiquer que la définition de Rankine était requise pour penser et justifier que les différentes grandeurs de force vive, travail, chaleur,... , sont des manifestations d'une même grandeur. Le raisonnement peut être reconstruit ainsi : les grandeurs A et B peuvent être conçues comme les instances de la même grandeur parce qu'une certaine valeur a de A et une certaine valeur b de B sont équivalentes en termes de capacité des systèmes considérés à produire les mêmes changements. L'expérience de Joule évoquée plus haut illustre bien cette équivalence : la force vive associée à la chute de masses peut produire l'augmentation de la température d'un liquide, de façon équivalente à un apport de chaleur.

En lien avec ce dernier point, nous pouvons formuler la caractéristique suivante de l'énergie :

(4) L'énergie peut prendre différentes formes.

Sur ce point et les suivants, je serai plus concis (pour plus de précisions, voir Bächtold & Guedj, 2014). J'indiquerais ici que l'histoire du concept révèle que les scientifiques n'ont pas d'abord découvert l'énergie comme une grandeur bien définie et se manifestant sous une forme particulière (ex : énergie cinétique) avant de chercher les autres formes sous lesquelles elle pourrait également se manifester (ex : énergie thermique, énergie électrique...). Les scientifiques ont d'abord défini des grandeurs distinctes représentant des réalités physiques distinctes (ex : force vie, travail, chaleur,...) avant de les rapprocher et de les concevoir comme des expressions d'une même grandeur, l'énergie.

La caractéristique suivante de l'énergie peut être formulée ainsi :

(5) L'énergie peut se transformer, ou autrement dit, changer de forme.

Là encore, une reconstruction logique des idées associées à l'énergie pourrait nous conduire à opérer une inversion par rapport à la construction historique de ces idées (Bächtold, 2017). Au XIXe siècle, les scientifiques n'ont pas d'abord identifié différentes formes d'énergie avant de découvrir les diverses transformations possibles, c'est-à-dire divers processus physiques changeant une forme d'énergie en une autre. Au lieu de cela, ils ont d'abord observé plusieurs processus mettant en lien différents types de phénomènes (par exemple, courant électrique et mouvement, ou mouvement et chaleur) et les ont considérés comme de processus de « conversion », puis ont cherché à expliquer ces processus en termes de la transformation d'une quantité qui se conserve durant ces conversions, alors identifiée comme étant l'énergie (Kuhn, 1959, Elkana, 1974, Harman, 1982, Smith, 2003).

La possibilité pour l'énergie de pouvoir être transférée ou échangée est à considérer comme une caractéristique supplémentaire et indépendante de sa possibilité d'être transformée :

(6) L'énergie peut être transférée d'un système à un autre.

Les modes de transfert d'énergie, qui s'opèrent entre deux systèmes, sont à distinguer des formes d'énergie, qui peuvent être associées à un système seul. En particulier, la chaleur, qui est un mode de transfert d'énergie (appelé aussi « transfert thermique) ne doit pas être considéré comme la propriété d'un système ni comme une substance autonome. Ces clarifications et distinctions ont mis du temps à s'opérer dans l'histoire des sciences. En particulier, l'histoire des conceptions de la chaleur est relativement complexe. Quatre étapes peuvent être distinguées : (i) dans la première partie du XIXe siècle, une période d'affrontement entre la conception substantialiste en termes d'un fluide (défendue notamment par Black puis Carnot) et de la conception mécaniste en termes du mouvement des particules constitutives des corps (défendue notamment par Rumford et Davy), (ii) l'avènement et la chute de la conception ondulatoire dans les années 1830 (dont un reliquat est l'idée erronée selon laquelle la chaleur pourrait être propagée par un rayonnement électromagnétique, alors que chaleur et rayonnement électromagnétique correspondent à deux modes distincts de transfert d'énergie), (iii) l'interprétation des expériences de conversion de travail en chaleur dans les années 1840 contribuant à un abandon de la conception substantialiste et donnant crédit à la conception mécaniste, mais avec l'idée que la chaleur serait une forme d'énergie (absence de distinction entre énergie thermique et transfert thermique) et (iv) l'interprétation microscopique de la chaleur en termes de travail microscopique au niveau des molécules dans le cadre de la théorie cinétique des gaz, laquelle permet à la fois de s'émanciper définitivement de la conception substantialiste et de concevoir la chaleur comme un mode de transfert de l'énergie (Brusch, 1976).

En pratique, il est très fréquent qu'un système interagisse avec son environnement. Dans ce cas, une partie de l'énergie du système lui est transférée et répartie entre un très grand nombre de sous-systèmes qui compose cet environnement. On parle de « dissipation » :

(7) L'énergie peut se dissiper dans l'environnement.

En pratique donc, il y a généralement une perte apparente d'énergie. C'est un problème auxquels étaient confrontés les scientifiques au milieu du XIXe siècle une fois introduite la grandeur énergie. En particulier, dans les machines à vapeur, on observait toujours qu'une partie seulement de la chaleur était convertie en travail effectivement utilisé, l'autre partie étant perdue. Qu'advient-il de la partie perdue ? S'agit-il d'une annihilation d'une partie de la chaleur ? C'est Thomson (1851, 1852) qui a permis de résoudre le problème, en deux temps. Dans son article de 1851, il développe l'idée de Joule selon laquelle il n'y a jamais

annihilation d'énergie, mais uniquement des *transformations* de celle-ci. Par conséquent, les pertes apparentes d'énergie sont des pertes pour les êtres humains (qui veulent l'utiliser dans des machines) et non des pertes dans l'absolu. Dans son article de 1852, Thomson précise sa réponse en introduisant la notion fondamentale de *dissipation*. Dans une machine à vapeur, une partie de l'énergie mécanique se dissipe par le mode de la chaleur en raison de frottements (« friction ») au niveau des différents éléments de la machine, lesquels sont inévitables en pratique. Étant « dissipée », c'est-à-dire répartie sur un très grand nombre de sous-systèmes de l'environnement, cette énergie est perdue de façon irréversible. Par ce retour historique sur le raisonnement de Thomson, on voit toute l'importance de la distinction à opérer entre la perspective utilitariste (perte d'énergie pour le fonctionnement des machines) et la perspective physique (dissipation de l'énergie dans l'environnement).

Tous les ingrédients sont maintenant réunis pour introduire la dernière caractéristique de l'énergie :

(8) *L'énergie d'un système isolé se conserve.*

Cette caractéristique ne peut se comprendre pleinement qu'à la lumière des autres caractéristiques explicitées précédemment. En effet, la notion de conservation est à mettre en relation avec les notions de transfert et de transformation (ou conversion). Comme l'écrit Duit (1984): « Lorsque l'énergie est transférée d'un système à un autre, ou lorsque l'énergie est convertie d'une forme en une autre, la quantité d'énergie ne change pas ». En outre, pour admettre la conservation de l'énergie d'un système, il convient de considérer le cas idéalisé où ce système n'interagit pas avec son environnement. Lorsqu'il interagit avec son environnement, le système échange de l'énergie. En particulier, en présence de frottements, une partie de l'énergie du système se dissipe dans son environnement. Afin d'éviter la contradiction manifeste avec le principe de la conservation de l'énergie, il convient alors de considérer le système complexe constitué du système étudié et de l'environnement avec lequel il interagit : si ce système complexe est isolé (ce qui est également une idéalisation), alors son énergie est conservée.

Quelles sont les fonctions de l'énergie ?

Venons-en à la troisième question : à quoi sert le concept d'énergie ? Ou autrement dit, quelles sont les fonctions que remplit ce concept en physique ? Cette question peut s'inscrire dans la perspective pragmatiste développée dans la partie 2 « Physique et philosophie pragmatiste ». Je propose ici de réviser légèrement la proposition faite à ce propos dans l'article cité plus haut (Bächtold & Guedj, 2014) : en distinguant quatre fonctions (plutôt que trois) et en modifiant leur présentation. Les deux premières peuvent être identifiées en considérant l'usage qui est fait par les physiciens du concept d'énergie (ou plus précisément du principe de conservation de l'énergie) dans la résolution de problèmes dans le cadre d'une théorie donnée :

F_1 : *Fonction prédictive*. Dans le cadre de toute théorie, le principe de conservation de l'énergie permet de faire des prédictions concernant la valeur de certaines grandeurs non déterminées. On peut penser à l'exemple paradigmatique suivant : en mécanique, le principe de la conservation de l'énergie appliqué à un corps glissant ou roulant le long d'un plan incliné permet de prédire la vitesse de ce corps en un temps t_2 étant données la position et la vitesse de ce corps en un temps précédent t_1 (si la dissipation d'énergie peut être négligée).

Cette fonction manifeste au niveau de la pratique des physiciens peut être considérée comme la traduction d'une fonction plus fondamentale :

F₂ : Fonction d'invariant. L'énergie est un pôle invariant pour penser les variations observées au niveau des phénomènes. Ce point a été mis en avant par Mach dès la fin du XIXe siècle. Parlant du principe de la conservation de l'énergie, il écrit : « Une variation isolée, qui ne serait reliée à rien, sans point de comparaison fixe, est inconcevable et unimaginable. » (Mach, 1987 [1883]). Plus précisément, c'est en décrivant les phénomènes en termes de *transformation*, de *transfert* et de *conservation* d'énergie, qu'il est possible de penser les variations observées.

En outre, l'étude historique du concept scientifique d'énergie permet de dégager deux autres fonctions. La première apparaît lorsque l'on considère le rôle qu'a pu jouer le principe de conservation de l'énergie notamment dans la première partie du XXe siècle :

F₃ : Fonction heuristique. Le principe de conservation joue un rôle de guide dans le développement des théories : étant admis comme un principe, il impose une contrainte formelle à laquelle doit se plier toute nouvelle structure formelle. Un exemple célèbre à ce propos est celui de l'apparente disparition d'énergie lors de certaines désintégrations nucléaires, qui a conduit Pauli au début des années 1930 à anticiper l'existence du neutrino afin de préserver le principe de conservation (Guerra et al., 2014). Un autre exemple est celui de la dérivation de l'équation $E_0=mc^2$ qui repose en particulier sur le principe de conservation de l'énergie (Einstein, 1905). Un dernier exemple significatif est celui de la dérivation par Heisenberg de l'une des deux formulations de la mécanique quantique, la mécanique matricielle, qui a été guidée, suivant la description historique qu'en fait Heisenberg lui-même, par la contrainte de la conservation de l'énergie (Heisenberg, 1972 [1969]).

La dernière fonction n'est pas manifeste lorsque l'on se contente de considérer l'usage qui est fait aujourd'hui du concept d'énergie par les physiciens dans le cadre de diverses théories. C'est l'étude de l'émergence du concept au milieu du XIXe siècle, présentée plus haut, qui permet de la dégager :

F₄ : Fonction d'unification. L'énergie est un pôle unificateur permettant de faire référence à une grande diversité de phénomènes et établir des liens entre eux. Cette fonction d'unification est bien mise en lumière par l'histoire du concept. À partir du début du XIXe siècle, l'émergence de nouveaux domaines liés à l'observation de nouveaux phénomènes (tels que des phénomènes thermiques, électriques, magnétiques, chimiques) a conduit à un morcellement de la physique sur le plan conceptuel et théorique. De nombreux scientifiques étaient alors animés par l'objectif d'unifier ces domaines. Ils ont trouvé dans le concept d'énergie un moyen d'opérer en partie cette unification au niveau conceptuel. Comme l'a souligné Harman (1982), « le statut fondamental de l'énergie est dérivé de son immutabilité, de sa convertibilité et de son rôle unificateur en reliant tous les phénomènes à travers un réseaux de transformations d'énergie ».

Prendre conscience de cette fonction, selon nous, apparaît essentiel pour avoir une pleine compréhension du rôle que joue le concept d'énergie dans tout l'édifice de la physique. À cet égard, deux points importants méritent d'être soulignés. Premièrement, comme l'indique la citation d'Harman, la notion de transformation constitue un aspect de l'énergie qui est essentiel pour penser les liens et donc l'unification entre les différents domaines de

la physique. Deuxièmement, la définition de Rankine en termes de capacité d'un système à produire des changements, de par sa portée universelle, permet de penser l'énergie comme une grandeur ayant un rôle unificateur : elle est applicable dans tous les domaines de la physique.

Les évolutions du concept d'énergie

Depuis son introduction dans le domaine de la physique au milieu du XIXe siècle, le concept d'énergie a connu diverses évolutions. En physique, ses contours ont été redéfinis avec l'avènement de la théorie de la relativité restreinte (lien étroit entre énergie et masse), puis dans le cadre de la mécanique quantique (quantification de l'énergie et relation d'indétermination temps-énergie). Rapidement, le concept d'énergie a été importé dans de multiples autres domaines : en chimie, biologie, psychologie, sociologie, économie, dans les arts et les lettres, etc. Dans nos recherches sur l'histoire et l'épistémologie de l'énergie, il nous semblait également important de comprendre les évolutions du concept en physique et sa diffusion dans les autres domaines. Quelles propriétés ont été assignées au concept dans ces domaines ? Sa signification est-elle la même que celle en physique ? Quel rôle a joué l'énergie dans ces domaines ? A-t-il été importé par quête de légitimité scientifique ou par besoin théorique ? Pour explorer ces questions, Muriel Guedj et moi-même avons organisé trois journées d'étude et un symposium lors desquelles des spécialistes de ces différents domaines ont apporté des éclairages variés sur le concept d'énergie : « Etudes transversales sur l'énergie » (MSH de Montpellier, 10 mai 2011), « Origines de l'énergie, énergies de demain » (Congrès 2011 de la *SFHST*, Nantes, 20 mai 2011), « Enseigner l'énergie » (MSH de Montpellier, 31 mai 2011), « La diffusion du concept d'énergie » (MSH de Montpellier, 14 mai 2012). Ces journées ont réuni notamment Michael Achilli, Vincent Bontems, Claude Cohen-Tannoudji, Danièle Ghesquier, Gabriel Gohau, Jacques Grinevald, Etienne Klein, Jean-Pierre Llored, Pascal Nouvel, Michel Paty, Dominique Pecaud, Luc Valentin et Geneviève Vincent.

Confrontés à la richesse et la complexité de l'histoire du concept d'énergie dans la physique et dans les autres domaines au cours des XIXe et XXe siècles, il nous est apparu intéressant de modéliser les trajectoires multiples de l'énergie à travers le temps et les domaines au moyen d'une « ontologie » au sens du web sémantique. L'objectif était d'élaborer ce que nous avons appelé un « atlas scientifique » tenant compte de la dimension temporelle, permettant d'incorporer des corpus et précisant les types de liens entre les différents éléments de l'atlas. En collaboration avec plusieurs chercheurs d'autres laboratoires (Centre François Viète, École centrale de Nantes, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, Laboratoire d'Histoire des Sciences et de Philosophie Archives Henri Poincaré), nous avons réalisé une recherche en 2012-2013 visant à développer de telles ontologies en histoire et philosophie des sciences. Cette recherche a été menée dans le cadre du projet *SemanticHPST (Semantic approach to epistemology and history of science and technology*, financé par le Réseau National des MSH). L'un des enjeux concernait la manière dont pouvait être intégré le temps. Concernant le concept d'énergie, nous avons élaboré une ébauche d'ontologie, qui a permis de penser l'intégration et la mise en lien d'une pluralité de catégories : le champ conceptuel associé à l'énergie, ses fonctions, ses propriétés, les disciplines scientifiques dans lesquelles le concept est utilisé, les acteurs et communautés de pratiques mobilisant le concept, les corpus portant sur le concept et les questions débattues associées à l'énergie. L'étape suivante, que nous nous sommes contentés d'amorcer et qui n'a pas été menée à son terme, consistait à rendre opératoire une telle ontologie en la traduisant dans un logiciel permettant de l'implémenter sur

Internet. L'idée était de créer une ressource interactive et collaborative qui puisse être enrichie par les chercheurs travaillant sur l'énergie et qui offre à l'utilisateur la possibilité de naviguer à travers les trajectoires multiples de l'énergie.

3.4 Programmes, manuels et pratiques : quelle progression d'enseignement ?

Dans la troisième étape de notre programme de recherche sur l'énergie, nous nous sommes appuyés sur l'étude de la littérature en didactique des sciences et sur l'étude historique et épistémologique du concept pour analyser les programmes et les manuels français sur l'ensemble de la scolarité, de l'école primaire (au cycle 3) jusqu'à la fin du lycée (en Terminale S), ainsi que certains aspects des pratiques d'enseignement. L'objectif de cette analyse était de nourrir la réflexion sur la question de la progression d'enseignement de l'énergie : comment enseigner l'énergie tout au long de la scolarité ? En particulier, quels aspects de l'énergie doivent être enseignés aux différents niveaux et comment les articuler ? Plusieurs études empiriques récentes ont permis de dégager chez les élèves (qui suivent des enseignements ordinaires) une progression dans leur apprentissage de ce concept (Liu & McKeough, 2005, Lee & Liu, 2010, Nordine et al., 2011, Colonnese et al., 2012, Neumann et al., 2013, Lacy et al. 2014, Duit, 2014) : dans l'ordre, ils maîtrisent tendanciellement d'abord les sources et les formes d'énergie, puis les transformations et les modes de transfert d'énergie, puis, en fin de cursus, la notion de dissipation et le principe de conservation. Ces études apportent des informations précieuses pour envisager une progression dans l'enseignement du concept. Cependant, elles ne la déterminent pas de manière précise et univoque. Elles ne disent rien sur la distinction système/environnement ou encore sur la définition de l'énergie. En outre, on peut remarquer que la progression d'apprentissage identifiée est peut-être dépendante, dans une certaine mesure, de la progression d'enseignement et non uniquement liée à la maturation intellectuelle des élèves. En outre, ces études empiriques ne permettent pas de déterminer quelles sont les stratégies d'enseignement les plus pertinentes parmi celles évoquées plus haut (section 3.2). Pour examiner cette question de la progression de l'enseignement de l'énergie, il nous a paru intéressant d'étudier une progression effectivement proposée dans un système scolaire, celui de la France, comme base de discussion. C'est pourquoi, nous avons analysé les programmes et manuels français, puis certains aspects des pratiques d'enseignement de l'énergie (nous y reviendrons plus loin dans cette section). Quelle progression de l'enseignement de l'énergie les programmes et manuels proposent-ils ? Pouvons-nous y trouver des éléments des stratégies proposées dans la littérature ?

La notion de *progression* de l'enseignement de l'énergie mérite d'être précisée. Deux aspects de cette progression peuvent être distingués. Le premier concerne la sélection des notions et contenus associés à l'énergie qui sont introduits à chaque niveau. On peut ainsi envisager un enrichissement progressif du primaire au secondaire. Le second aspect concerne le niveau de formulation et le choix du vocabulaire. À cet égard, une différenciation en fonction du niveau scolaire peut être proposée. Ce sont deux aspects qu'il convient de prendre en compte pour penser une progression de l'enseignement permettant une conceptualisation progressive par les élèves des notions et contenus associés à l'énergie.

Notons que ces deux aspects de la progression renvoient à la notion de transposition didactique, laquelle décrit la transformation que subissent les savoirs savants (Chevallard, 1991) au niveau de leur contenu, de leur formulation et de leur structuration, afin de les rendre accessibles aux élèves et de permettre leur apprentissage. Toutefois, ils ne s'y réduisent pas. Ainsi, avec la notion de progression tout au long de la scolarité, il est question

d'une transposition didactique pensée *sur le long terme* et non simplement pour un niveau donné (comme c'est le cas dans de nombreuses recherches en didactique des sciences).

Dans les programmes et les manuels

Dans le cadre de notre analyse, nous avons choisi d'abord de nous pencher sur les deux étapes de cette transposition qu'opèrent respectivement les auteurs des programmes et les auteurs des manuels scolaires. Pourquoi s'intéresser aux programmes ? Parce qu'ils traduisent les choix de transposition externe (bien que l'on n'ait pas accès aux savoirs savants qui servent de référence aux auteurs de ces programmes) et conditionnent fortement les étapes suivantes du fait de leur statut prescriptif. Ils constituent des éléments du curriculum « prescrit » (Perrenoud, 1993), c'est-à-dire du parcours d'enseignement pensé ou idéalisé par les acteurs du système éducatif et jouant le rôle de norme professionnelle pour les enseignants. Pourquoi analyser les manuels scolaires ? Premièrement, les manuels constituent des ressources pour les enseignants sur lesquelles ils peuvent s'appuyer pour interpréter les instructions officielles. Ils constituent ainsi une référence pour les enseignants. Deuxièmement, les manuels proposent des exemples de séquences que les enseignants sont susceptibles de mettre en œuvre en classe. Bien que leur étude ne préjuge pas de ce qui est réalisé dans les classes, les manuels sont des indicateurs intéressants de par leur position entre prescription et réalité de la classe.

L'analyse que nous avons menée a été présentée dans l'article mentionné plus haut (Bächtold, Munier, Guedj, Lerouge & Ranquet, 2004). Du point de vue méthodologique, nous avons appliqué une grille d'analyse constituée des éléments suivants (pour le détail des indicateurs de la grille, voir l'article). Nous avons analysé dans un premier temps les contenus des programmes selon les différents niveaux pour examiner la manière dont sont introduits les différents aspects de l'énergie requis pour aboutir au principe de conservation, s'ils sont présents ou non et à quel niveau ils apparaissent. En particulier, nous avons cherché à savoir si, lors de l'introduction du principe de conservation de l'énergie, les programmes et manuels mettent ou non l'accent sur l'identification du système et si cette introduction se fait simultanément ou pas avec celle de la notion de dissipation. Nous avons ensuite analysé les programmes et manuels en cherchant à voir s'ils privilégient une entrée à partir des transformations d'une forme d'énergie en une autre ou à partir des transferts énergétiques. Nous avons aussi étudié la façon dont les programmes et manuels se positionnent par rapport à la conception substantialiste de l'énergie et s'ils le font explicitement ou non. Notre étude historique et épistémologique du concept d'énergie ayant mis en lumière la fonction essentielle d'unification, il nous a également paru intéressant d'étudier si celle-ci est abordée explicitement ou non, notamment en analysant dans les programmes et les manuels l'organisation qui est proposée des différentes parties traitant de l'énergie et leur articulation. Enfin, nous avons analysé la façon dont la partie traitant des questions sociétales liées à l'énergie est articulée avec l'enseignement du concept scientifique d'énergie : quels sont les questions sociétales abordées ? Comment sont-elles traitées par les programmes et manuels de physique ? Les points de rupture apparents entre les deux conceptions de l'énergie évoquées plus haut (la conception scientifique et celle véhiculée dans les débats de société) sont-ils pris en charge explicitement ou pas, au risque alors de faire obstacle à l'enseignement du concept scientifique d'énergie ?

Au niveau du corpus, notre analyse a porté, d'une part, sur les programmes en vigueur au moment de l'étude (socle commun de connaissances et de compétences (MEN, 2006), programmes et progressions en sciences expérimentales à l'école (MEN, 2008a, 2012) et

programmes de physique-chimie du collège et du lycée (MEN, 2008b, 2010b, 2011) et, d'autre part, sur une sélection de manuels scolaires, ceux qui sont les plus couramment rencontrés dans les classes (4 manuels pour le cycle 3, 7 pour la 3^{ème}, 5 pour la Première S et 5 pour la Terminale S).

Dans ce qui suit, je présenterai les éléments de conclusion et de discussion de l'analyse en les illustrant par des exemples (pour l'analyse complète, voir l'article indiqué plus haut). Nous avons constaté que le principe de conservation de l'énergie fait figure de point d'aboutissement de la progression proposée par les programmes et manuels jusqu'à la Première S, en accord avec ce qui est préconisé de façon consensuelle dans la littérature. Ainsi, les différents aspects de l'énergie que les élèves doivent connaître pour maîtriser ce principe (sources, formes, transformations, transferts et dissipation) sont abordés tout au long de la scolarité. Toutefois, un élément pour la maîtrise du principe, pointé comme étant important par certains auteurs, n'est pas introduit par le programme et n'est pas abordé par plusieurs manuels : l'identification du système et sa distinction de l'environnement avec lequel il échange de l'énergie. En outre, le vocabulaire employé par les programmes et les manuels présente des ambiguïtés susceptibles d'empêcher les élèves de différencier clairement les différents aspects de l'énergie : les sources et les formes d'énergie, les formes et les modes de transfert d'énergie ou encore les différents modes de transfert d'énergie. Par exemple, dans le programme du cycle 3, le terme « énergie » est employé de façon ambiguë : dans certains cas, pour parler des formes d'énergie (« connaître différentes énergies »), dans d'autres, pour parler des sources d'énergie (« classer les énergies selon qu'elles soient ou non renouvelables »). On repère également une confusion entre source et mode de transfert à propos de l'électricité dans plusieurs manuels de cycle 3, lesquels présentent cette dernière comme une source d'énergie. Ou encore, on peut relever dans les programmes du collège les deux expressions ambiguës suivantes : « transfert d'énergie électrique » en 5^{ème} et « transfert [...] sous forme de chaleur » en 4^{ème}. Ces deux expressions peuvent générer une confusion entre formes et modes de transfert d'énergie.

Si une progression vers le principe de conservation de l'énergie peut être identifiée dans les programmes et les manuels de l'école élémentaire à la Première S, le rôle que joue la Terminale S dans cette progression apparaît plus flou. Le principe de conservation n'y est plus mobilisé (sauf dans un manuel), alors qu'on aurait pu attendre des programmes et des manuels qu'ils proposent de le mettre en œuvre afin que les élèves puissent davantage se l'approprier. Il n'est question en Terminale S que de la conservation de l'énergie mécanique. Or, une telle approche, comme je l'ai indiqué plus haut, risque de favoriser la confusion chez les élèves entre conservation de l'énergie mécanique et conservation de l'énergie.

Comment les programmes et les manuels se situent-ils par rapport aux stratégies didactiques discutées dans la littérature ? Est-il préférable de privilégier une entrée par les transformations ou par les transferts ? La conception substantialiste de l'énergie est-elle à exploiter ou à éviter ? Suivant notre analyse, ces deux questions semblent être ignorées par les auteurs des programmes et des manuels. Concernant la première question, le résultat de nos analyses peut se résumer ainsi : les transformations d'énergie sont très présentes au collège, mais nettement moins au lycée ; le transfert thermique est le seul mode de transfert abordé à la fois au collège, en Première S et en Terminale S ; dans l'ensemble des programmes, il n'est jamais suggéré de faire une synthèse concernant les différents modes de transferts (travail mécanique, travail électrique, transfert thermique et rayonnement électromagnétique), seul un manuel prenant l'initiative de consacrer un paragraphe à ce

sujet. Par conséquent, ni l'entrée par les transformations, ni celle par les transferts n'est privilégiée.

S'agissant de la seconde question, notre analyse nous conduit à une réponse en deux temps. En nous basant sur différents indicateurs (ex : occurrence des expressions « production », « consommation », « transport » et « stockage » d'énergie qui traitent cette grandeur comme s'il s'agissait d'un fluide comparable à un carburant), nous avons repéré la présence de la conception substantialiste dans plusieurs parties des programmes et des manuels. Cependant, nous avons constaté que cette dernière n'est jamais présentée comme étant une analogie entre matière et énergie. *A fortiori*, le statut d'analogie et les limites de cette analogie ne sont jamais discutés. Cela nous laisse penser que le traitement parfois substantialiste de l'énergie ne résulte pas d'un réel choix didactique des auteurs des programmes et des manuels, lesquels ne semblent pas intentionnellement véhiculer cette conception. Nous pouvons également conclure que l'obstacle que celle-ci peut constituer n'est pas pris en considération.

Les auteurs des programmes et des manuels mettent-ils en avant la fonction d'unification du concept d'énergie ? Dans les introductions des programmes du collège et du lycée, le fait que l'énergie est présente dans tous les domaines de la physique est mis en avant. Cela correspond bien à un aspect de la fonction d'unification. Cependant, l'idée principale selon laquelle ce concept permet de *mettre en lien* ces domaines n'est jamais explicitée. Concernant l'organisation des parties traitant de l'énergie, on constate globalement un morcellement. Plus précisément, en 3^{ème}, le programme aborde l'énergie dans trois sections séparées, portant respectivement sur l'énergie chimique, électrique et mécanique, sans section de synthèse. Cette organisation morcelée est reprise par la plupart des manuels. Dans le programme de Première S, les différents aspects de l'énergie sont également dispersés dans de nombreuses sections. Il n'existe pas de section de synthèse à part entière, mais l'item « formes d'énergie » constitue une opportunité de mettre en relation les différentes formes d'énergie du programme, laquelle est saisie par plusieurs des manuels analysés. Les manuels du collège et de Première S qui choisissent de regrouper dans une même partie tous les chapitres traitant de l'énergie sont l'exception. Dans la partie *Comprendre* de la Terminale S, l'énergie est abordée dans deux sections nettement séparées, respectivement sur l'oscillateur et les transferts thermiques. Cette séparation, qui préfigure la coupure traditionnelle à l'université entre mécanique et thermodynamique, tend au cloisonnement des différents aspects de l'énergie. Cette organisation morcelée, qui est reprise par les manuels étudiés, ne permet pas de mettre en lumière la fonction d'unification du concept d'énergie.

Enfin, nous avons cherché à mettre en évidence la manière dont les programmes et les manuels gèrent la double approche de l'énergie, scientifique et sociétale. Quels que soient les niveaux d'enseignement, la visée de la partie sociétale des programmes est de permettre aux élèves, citoyens de demain, de s'emparer des questions liées aux besoins en énergie, à l'environnement, etc., en s'appuyant sur des connaissances scientifiques solides. Ces orientations trouvent dans les manuels des traductions différentes. Celles-ci ne sont pas systématiquement en prise avec les contenus scientifiques censés être mobilisés. En particulier, la partie sociétale des manuels ne mobilise qu'à la marge le principe de conservation de l'énergie. De plus, les programmes et manuels n'explicitent pas les points de rupture apparente entre les deux approches scientifique et sociétale. Selon nous, les termes « production » ou « consommation » d'énergie devraient être discutés explicitement en classe, afin que les élèves prennent conscience qu'il s'agit en fait de transformations

d'énergie. Selon nous, les élèves doivent apprendre à « commuter » sans confusion entre les deux types d'usage du terme énergie pour pouvoir tirer avantage de leur formation scientifique lorsqu'ils prennent part aux discussions sociétales liées à l'énergie.

En fin de compte, si dans leurs grandes lignes, les textes des programmes et les manuels du cycle 3 à la Terminale S proposent une progression qui peut apparaître pertinente, dans le détail des points spécifiques qui viennent d'être discutés, ils restent imprécis ou lacunaires. Au-delà des intentions générales affichées, ce sont sur ces zones de flou, susceptibles de générer des obstacles à la conceptualisation de l'énergie, qu'il paraît important de développer de nouvelles recherches.

Quelle définition de l'énergie ?

Dans une seconde étude, j'ai prolongé cette analyse des programmes et des manuels en la focalisant sur la définition de l'énergie et en la combinant à une enquête sur les pratiques déclarées d'enseignants à ce sujet. Cette étude a donné lieu à un article publié dans la revue *Research in Science Education* (Bächtold, 2018). Si plusieurs auteurs ont discuté la question de la progression de l'enseignement de l'énergie (voir les auteurs cités plus haut), ceux-ci n'ont prêté que peu d'attention jusque-là à la place de la définition de l'énergie dans cette progression. Les enseignants devraient-ils fournir à leurs élèves une telle définition ? Si oui, quelle définition et à quel niveau du cursus devraient-ils le faire ? Ces questions ne vont pas de soi, notamment en raison de l'absence de consensus chez les spécialistes sur la définition même de l'énergie. La démarche suivie pour mener cette étude se compose de 3 étapes. Dans la première étape, j'ai examiné si et comment l'énergie peut être définie dans le champ de la physique. Deux principales approches peuvent être distinguées à cet égard : selon la première, il n'y a pas de définition satisfaisante de l'énergie et la conservation doit être considérée comme sa propriété fondamentale ; la seconde met en avant la définition de Rankine de l'énergie comme la capacité d'un système à produire des changements. Comme je l'ai développé dans la section précédente, on peut considérer que la conservation n'est pas une propriété discriminante et la définition de Rankine se révèle être tout à fait acceptable sur le plan scientifique. Toutefois, de fait une partie des chercheurs défendent la première approche. Autrement dit, le discours des spécialistes n'est pas unanime sur ce point.

Qu'en est-il dans l'enseignement ? La seconde étape de mon étude a consisté à étudier la manière dont l'énergie est (ou n'est pas) définie tout au long de la scolarité dans le cas de la France : l'une ou l'autre de ces deux approches est-elle privilégiée ? Pour ce faire, il s'agissait préalablement de clarifier ce que l'on entend par « définition ». Suivant Margenau (1950), Galili et Lehavi (2006) distinguent les définitions « nominales » et « opérationnelles » : « Une définition nominale cherche à établir la signification d'un concept en le reliant à d'autres concepts et en listant ses propriétés caractéristiques ; elle est associée à une théorie. Une définition opérationnelle, quant à elle, définit un concept en termes d'une mesure particulière, indiquant l'appareil, les conditions de la mesure et possiblement aussi les unités ». Galili et Lehavi proposent également de distinguer une sous-catégorie de définitions nominales : la « définition lexicale », qui inclut « les énoncés figuratifs, les "termes non formels", [...] les expressions occasionnelles reliées de façon seulement vague à une théorie [et] des concepts [...], reliées à des expériences communes, des sensations ou des idées ».

Dans un premier temps, l'analyse a porté sur le corpus des programmes et des manuels de la première étude étendue à un nombre plus important de manuels (28 manuels du cycle 3 au lycée). Elle a consisté à repérer les occurrences de définitions nominales ou

opérationnelles de l'énergie. Il s'agissait en particulier de relever les formulations conformes à la définition de Rankine et celles mettant en avant la propriété de conservation. Voici les principaux éléments de cette analyse. Au niveau de l'école primaire (cycle 3), une majorité de manuels donne une définition de type lexicale de l'énergie correspondant à une adaptation de la définition de Rankine (ex : « L'énergie permet à un objet de se mettre en mouvement, de produire de la lumière ou de la chaleur »), suivant ainsi une phrase du programme qui toutefois parle de « source d'énergie » plutôt que d'« énergie » (« l'utilisation d'une source d'énergie est nécessaire pour chauffer, éclairer, mettre en mouvement »). Au collège, dans l'introduction du programme, la définition de Rankine est explicitement introduite en ces termes : « L'énergie apparaît comme la capacité que possède un système de produire un effet ». Néanmoins, peu de manuels suivent le programme et reprennent cette définition. À l'inverse, alors que le programme de ce niveau ne fait pas mention de la conservation de l'énergie (ce n'était pas le cas dans le programme de 2008, mais c'est le cas dans celui de 2015), plusieurs manuels prennent l'initiative de mentionner cette propriété et de la présenter comme fondamentale. Au lycée, le programme ne donne aucune définition de l'énergie. La plupart des manuels de Première S, mais aucun de Terminale S, propose des définitions toutes différentes : un manuel celle de Rankine, un autre en listant les propriétés de l'énergie, un autre encore en référence aux forces fondamentales de la physique... Comme indiqué plus haut, le principe de conservation est central en Première S, tant dans le programme que dans les manuels, puis disparaît en Terminale S, absent du programme et mentionné par un seul manuel.

Dans un second temps, j'ai analysé les pratiques déclarées d'enseignants concernant leur manière de définir l'énergie en classe. Afin d'obtenir des données significatives sur le plan quantitatif, j'ai opté pour un questionnaire. Deux versions de questionnaire ont été construites, l'une adaptée aux enseignants du primaire, l'autre aux enseignants du secondaire. Elles comportaient une question ouverte et respectivement 6 et 7 questions fermées, avec des choix possibles correspond à des pratiques envisagées à la lumière de l'analyse des programmes et des manuels. Dans les deux versions, la première question était ouverte et générale : « Comment décrivez-vous l'énergie à vos élèves dans le cadre de l'enseignement de ce concept ? ». Le questionnaire étant électronique, cette première question pouvait être posée sans que les questions suivantes induisent des réponses. Dans les questions suivantes, il était demandé explicitement si les enseignants introduisent dans leur classe une définition conforme à celle de Rankine (pour les enseignants du primaire : « Dites-vous à vos élèves que l'énergie c'est ce qui est "nécessaire pour chauffer, éclairer, mettre en mouvement" (extrait du BO de 2012 sur les progressions) ? » / pour ceux du secondaire : « Dites-vous à vos élèves que l'énergie c'est "la capacité que possède un système de produire un effet" (extrait de l'introduction du programme du collège en physique-chimie de 2008) ? ») et s'ils précisent à leurs élèves que l'énergie se conserve. Dans le cas positif, il était demandé si l'un ou l'autre de ces éléments est considéré par eux comme un élément important et utile de la description de l'énergie dans leur enseignement, et ce, de façon indirecte (en demandant : s'agit-il d'un élément « que vos élèves doivent écrire dans leur cahier de sciences / de physique-chimie et qu'ils doivent retenir » ou « que vous indiquez à vos élèves seulement à l'oral et qu'ils ne doivent pas nécessairement retenir » ?). Dans le cas négatif, il était demandé pour quelle(s) raison(s) : soit par une réponse libre, soit en cochant une ou des réponses prédéfinies (par exemple, concernant la définition de Rankine : « elle n'aide pas les élèves à comprendre ce qu'est l'énergie », « elle est trop abstraite » ou « vous ne connaissiez pas cette définition »).

Le questionnaire a été diffusé et soumis par voie électronique. 61 enseignants du primaire et 116 enseignants de physique-chimie du secondaire ont rempli le questionnaire. Je présente ici les principaux résultats. Considérons d'abord les réponses des enseignants du primaire. 90% ont répondu qu'ils introduisent en classe une version adaptée de la définition de Rankine. Une majorité d'entre eux (54,5%) considère que c'est un élément important de la description de l'énergie. En analysant leur réponse à la première question ouverte, on constate que 42% de ces enseignants mentionnent spontanément le fait qu'ils introduisent en classe une définition nominale dans la ligne de Rankine. Qu'en est-il de la propriété de conservation ? 29,5% des enseignants du primaire disent l'introduire et une minorité d'entre eux (27%) considère que c'est un élément important de la description de l'énergie. Aucun enseignant ne mentionne spontanément cette propriété dans leur réponse à la première question ouverte. Parmi la majorité qui disent ne pas l'introduire, 37% considèrent qu'elle est hors de portée des élèves du primaire, 28% invoquent le fait que ce n'est pas au programme et 44% admettent qu'ils ne connaissaient pas cette propriété.

Tournons-nous vers les réponses des enseignants du secondaire. 26% ont répondu qu'ils introduisent en classe la définition de Rankine. Une minorité d'entre eux considère que c'est un élément important de la description de l'énergie. En analysant leur réponse à la première question ouverte, on constate que 43% de ces enseignants déclarent spontanément qu'ils introduisent en classe une définition nominale dans la ligne de Rankine. Parmi ceux qui disent ne pas l'introduire, 53% la considèrent trop abstraite, 40% pensent qu'elle n'aide pas les élèves à comprendre ce qu'est l'énergie et 39% admettent qu'ils ne connaissaient pas cette définition. S'agissant de la propriété de conservation, 94% des enseignants du secondaire (sans différence significative entre le collège et le lycée) disent l'introduire et une majorité d'entre eux (81,5%) considère que c'est un élément important de la description de l'énergie. Cependant, en analysant leur réponse à la première question ouverte, on constate que seulement 21% de ces enseignants mentionnent spontanément cette propriété.

Des exemples de réponses à la première question sont donnés dans le tableau.

Cette étude met en évidence des tendances concernant la manière de définir l'énergie tout au long de la scolarité. À l'école primaire, l'approche de la définition de Rankine est préconisée par le programme et suivie par la plupart des manuels et des enseignants. Au collège, cette approche reste préconisée par le programme, mais seulement une partie des manuels et des enseignants font appel à la définition de Rankine ; l'autre partie privilégie une approche consistant à souligner la propriété de conservation, bien que cet aspect de l'énergie ne soit pas au programme (de 2008, ce qui a changé en 2015). Au lycée, la définition de Rankine n'est mentionnée ni par les programmes ni par les manuels ; toutefois, une partie des enseignants y a recours. En Première S, c'est l'approche en termes de conservation qui est privilégiée à la fois par le programme, les manuels et la majorité des enseignants. Par conséquent, on constate une absence de « cohérence curriculaire » dans la manière de définir l'énergie (pour reprendre l'expression de Fortus et al., 2015, p. 2) : la définition de l'énergie n'est pas « construite pas à pas » (*ibid.*) ; au contraire, l'énergie reçoit des définitions très différentes selon le niveau (définitions de Rankine ou en termes uniquement de conservation). Il est probable que ce déficit de cohérence constitue pour les élèves un obstacle à la compréhension de la signification de ce concept très complexe.

Question : Comment décrivez-vous l'énergie à vos élèves dans le cadre de l'enseignement de ce concept ?	
Exemples de réponses des enseignants de l'école primaire	Exemples de réponses des enseignants de physique-chimie du secondaire
<i>version adaptée de la définition de Rankine :</i> « L'énergie est à l'origine d'un mouvement, d'une chaleur ou de la lumière » « Ce qui permet de produire un travail »	<i>définition de Rankine ou version adaptée :</i> « Capacité d'un système à provoquer un déplacement, une déformation, ou à produire de la lumière ou de la chaleur » « Un corps possède de l'énergie s'il peut produire un travail »
<i>conservation de l'énergie :</i> aucun enseignant n'y fait référence spontanément	<i>conservation de l'énergie :</i> « Une grandeur physique dont on ne peut pas donner de définition mais qui se conserve toujours à condition de définir correctement le système »
	<i>l'énergie en relation au travail (sans être associée à la définition de Rankine) :</i> « C'est le travail d'une force »
<i>d'autres types de descriptions :</i> « Je la décris en terme d'énergie renouvelable ou non, de transformations, de pollution » « Outil pour le confort »	<i>d'autres types de descriptions :</i> « Une "chose" associée à chaque objet, qu'il peut échanger, accumuler, perdre, ... » « Quelque chose qui est échangé »
<i>description non scientifique :</i> « L'énergie est une forme de "carburant" permettant une mise en mouvement, une action »	
<i>l'énergie est difficile à décrire :</i> « Je n'aborde pas le sujet car je n'ai pas assez de connaissance »	<i>l'énergie est difficile à décrire ou n'est pas décrite :</i> « C'est très compliqué à définir » « L'énergie est un concept et ne peut donc pas se "décrire" »

Tableau 1 – Sélection de réponses d'enseignants à la question ouverte 1

Dans la troisième étape de mon étude, j'ai distingué et discuté deux options de progression envisageables en termes de définition de l'énergie, qui soient cohérentes du point de vue curriculaire : celle consistant à définir l'énergie comme une grandeur conservée et à mettre de côté la définition de Rankine tout au long de la scolarité ; et celle consistant à introduire à la fois la définition de Rankine et la conservation. Voici les éléments clés de cette discussion. Considérons d'abord la première option. Il convient de rappeler que le principe de conservation est très difficile à maîtriser par les élèves. À cet égard, trois alternatives peuvent être imaginées. La première, défendue par Warren (1982, 1991), revient à différer l'enseignement de l'énergie pour le faire débiter au collège voire au lycée, lorsque les élèves ont une maîtrise suffisante des outils mathématiques requis pour appliquer le principe. Cependant, cette alternative écarte l'idée même d'une progression d'enseignement de l'énergie et risque de favoriser chez les élèves un enracinement des conceptions erronées sur l'énergie, les rendant plus difficiles à ébranler.

La seconde alternative consiste à assurer une progression d'enseignement de l'énergie qui situe l'étude du principe de conservation à la fin de la scolarité. C'est ce que préconisent Neumann et al. (2013) en proposant une progression d'enseignement directement inspirée de la progression d'apprentissage qu'ils ont identifiée empiriquement : d'abord sont introduites les sources et les formes d'énergie, puis les transformations et les transferts

d'énergie et enfin les idées de dissipation et de conservation. Selon moi, cette proposition soulève au moins trois problèmes. Premièrement, si aucune définition formelle de type nominal n'est donnée aux élèves, ceux-ci ne peuvent s'appuyer que sur leurs conceptions initiales, lesquelles risquent alors de s'ancrer davantage. Or, la plupart de ces conceptions initiales sont en contradiction avec le concept scientifique d'énergie et en particulier avec le principe de conservation. Deuxièmement, l'idée d'enseigner les formes d'énergie dans une première étape, sans introduire la notion de transformation, présente des limites. L'histoire du concept d'énergie (voir section 3.3) met en évidence le fait que les scientifiques ont d'abord observé des processus de conversion, puis expliqué ceux-ci en termes de transformations d'énergie, interprétant à cette occasion les grandeurs en jeu comme des formes d'énergie. Aujourd'hui encore, ce qui donne sens à l'idée de formes d'énergie est la possibilité d'expliquer des processus physiques comme des transformations d'énergie. Désigner des grandeurs comme des formes d'énergie en laissant de côté la notion de transformation revient simplement à assigner des étiquettes, vides de fonction explicative, à ces grandeurs. Une réponse à cette seconde objection consiste à modifier la proposition de Neumann et ses collègues en introduisant d'emblée, dans la première étape, les formes et les transformations d'énergie. C'est ce que proposent Colonnese et al. (2002). Toutefois, la progression d'enseignement de Neumann et ses collègues ainsi modifiée soulève encore un troisième problème : si la notion de conservation n'est introduite qu'à la fin de la scolarité, cela signifie que les élèves doivent manipuler le concept d'énergie durant toutes les années précédentes sans connaître la propriété de l'énergie qui est supposée lui donner sa signification.

La troisième alternative dans le cadre d'une approche en termes de conservation, qui permet d'éviter ce dernier problème, revient à introduire la propriété de conservation dès l'école primaire, mais de façon qualitative, comme le proposent Colonnese et al. (2002) ou encore Lacy et al. (2014). Cependant, comprendre cette notion de conservation implique de maîtriser préalablement tout un ensemble d'autres notions (en particulier, les notions de forme, transformation, transfert et dissipation) et de savoir identifier le système pertinent. Attendre que les élèves à l'école primaire comprennent l'idée de conservation apparaît très ambitieux.

Considérons à présent une seconde option de progression d'enseignement, celle consistant à faire appel à la définition de Rankine tout au long de la scolarité et à introduire la conservation dans la dernière partie de la scolarité. Quel est l'intérêt de fournir aux élèves cette définition ? À l'école primaire, la définition de Rankine dans une version adaptée (voir ci-dessous) constitue un possible substitut aux conceptions initiales erronées des élèves, leur permettant d'avoir une première prise sur le concept. À noter qu'une étude empirique menée par Liu et McKeough (2005) a montré qu'une telle définition est tout à fait accessible aux élèves des 3^e et 4^e années de la scolarité (CE2 et CM1). Au lycée, en l'absence de définition formelle donnée aux élèves, ces derniers tendent à concevoir l'énergie en relation uniquement à un domaine de la physique, par exemple comme une sorte de force (en relation avec la mécanique) ou comme une mesure de l'agitation moléculaire (en relation à l'étude de la chaleur) (Bächtold & Munier, 2014). Cela conduit les élèves à « compartimenter » le concept d'énergie (Papadouris & Constantinou, 2016) et à ne pas prendre conscience de sa fonction d'unification. Une conséquence possible est qu'ils confondent alors le principe de conservation avec la conservation de l'énergie mécanique (Bächtold, Munier, Guedj, Lerouge & Ranquet, 2016). Or, comme cela a été souligné plus haut (section 3.3), la définition de Rankine a une portée universelle, qui transcende les

différents domaines de la physique. L'introduction de cette définition en classe pourrait donc aider les élèves à saisir la fonction d'unification du concept.

La définition de Rankine présente toutefois aussi des désavantages. En particulier, en lien avec sa portée universelle, cette définition est très abstraite, la rendant difficile à comprendre par les élèves. Les notions de capacité, de système et de changement, sur lesquelles elle repose, contribuent toutes trois à ce caractère abstrait. Est-il possible de rendre cette définition accessible aux élèves ? Plusieurs stratégies sont envisageables. La notion de changement peut être introduite en donnant des exemples concrets de changements (ex : mettre en mouvement, chauffer, produire de la lumière...) (option que je proposerais pour le secondaire). Le terme « changement » peut aussi simplement être remplacé par les exemples eux-mêmes (option que je privilégierais à l'école primaire). Le concept de système peut également d'abord (à l'école primaire) soit être remplacée par des exemples de systèmes (ex : « Une lampe a besoin d'énergie pour éclairer »), soit être ignorée (« L'énergie est nécessaire pour mettre en mouvement, chauffer, produire de la lumière... »). Quant à la notion de capacité, la notion sans doute la plus abstraite, elle peut également être introduite par l'intermédiaire de formulations plus accessibles, par exemple : si la notion de système est mise de côté, « L'énergie est ce qui *permet de* mettre en mouvement, chauffer, produire de la lumière... » ; si la notion de système est intégrée, « Grâce à son énergie, un système *est capable de* produire des changements tels que mettre en mouvement, chauffer, produire de la lumière... ».

Lors d'expérimentations menées dans des classes de Première S, nous avons introduit la définition de Rankine. Je reviendrai plus loin sur les résultats obtenus à cet égard (section 3.7).

3.5 L'enseignement de l'équation $E_0=mc^2$ au lycée

À l'occasion de l'analyse des programmes et des manuels décrite dans la section précédente, mon attention a été attirée par un point spécifique : le changement de positionnement dans les programmes du lycée de l'équation « $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ ». Alors que précédemment cette équation était à enseigner en Terminale S dans le cadre de l'étude des réactions nucléaires (MEN, 2001), le programme de 2010 préconise de l'étudier au niveau de la Première S, toujours en lien avec les réactions nucléaires (MEN, 2010b). Ce changement semble résulter d'une volonté de réunir l'ensemble des domaines de la physique et de la chimie faisant intervenir le concept d'énergie dans le programme d'une même année scolaire. En incluant une partie sur les conversions et les économies d'énergie dans un chapeau intitulé « Agir : défis du XXI^e siècle », ce programme invite également les enseignants à mettre en lien les approches scientifique et sociétale du concept. Il suggère, en particulier, d'articuler l'étude de l'énergie nucléaire sous l'angle de la physique avec l'étude des questions socio-économiques et environnementales concernant les centrales nucléaires à production d'électricité. Ce changement suscite plusieurs questions : quel est l'intérêt, sur le plan didactique, de réunir l'ensemble des domaines de la physique et de la chimie faisant intervenir le concept d'énergie dans le programme d'une même année scolaire ? L'interprétation de l'équation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ peut-elle être mise à la portée des élèves de Première S ? En particulier, l'entrée par l'étude des réactions nucléaires est-elle pertinente ? L'enseignement de l'équation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ est-il utile pour traiter les questions sociétales portant sur les centrales nucléaires ? Inversement l'étude de ces questions sociétales constitue-t-elle un champ de remobilisation de l'équation favorisant son apprentissage ? J'ai exploré ces questions en menant une étude plus ciblée qui a porté sur le

programme et les manuels de Première S. Celle-ci a donné lieu à une publication dans la revue *RDST* (Bächtold, 2014).

Une étape préalable à l'analyse du programme et des manuels a consisté à faire le point sur les savoirs savants de référence. Or, bien que l'équation $E_0 = mc^2$ soit simple en termes mathématiques, la question de son interprétation n'est pas évidente. Plusieurs aspects ont fait l'objet de débats. En outre, un certain nombre de confusions ou de mauvaises interprétations ont été pointées (voir en particulier Warren, 1976 ; Bondi & Spurgin, 1987). Afin de démêler les multiples aspects de l'interprétation de l'équation, j'ai proposé de distinguer trois points :

- La relation que l'équation $E_0 = mc^2$ établit entre la masse et l'énergie ;
- Les principes de conservation de l'énergie et de la masse et leur devenir eu égard à l'équation $E_0 = mc^2$;
- Les liens précis entre les grandeurs énergie de masse, énergie nucléaire, énergie interne et énergie de liaison.

Pour le détail de cette exploration à la fois historique, épistémologique et conceptuelle, je renvoie à l'article cité.

J'ai ensuite analysé et discuté la transposition didactique opérée par le programme de 2010 et une sélection de 5 manuels sur ces trois points. Voici les éléments de conclusion issus de cette analyse. Dans le programme et les manuels de Première S, il n'est pas question de l'établissement de l'équation $E_0 = mc^2$. Cela se justifie par le fait que la compréhension de cette dérivation est hors de portée des élèves de Première S. Elle requiert en particulier une maîtrise de la théorie de la relativité restreinte. En revanche, l'interprétation de l'équation semble être accessible aux élèves de ce niveau. Il est vrai que certains aspects de cette interprétation ont été ou restent débattus. L'idée parfois défendue d'une conversion de masse en énergie est problématique, car en contradiction avec le principe de conservation sur lequel repose la dérivation de l'équation, tandis que celle assez courante d'une « équivalence » entre la masse et l'énergie est pour le moins discutable, car masse et énergie, malgré leur lien, sont des grandeurs dont les définitions opérationnelles respectives (voir plus haut) renvoient à des effets observables distincts, qui sont donc bien différentes d'un point de vue pragmatiste. Toutefois, il existe une interprétation minimale et non problématique selon laquelle (i) tout système matériel possède, en vertu de sa masse, une certaine énergie appelée « énergie de masse » et (ii) un échange d'énergie entre des systèmes matériels restant au repos implique un échange de masse en quantité proportionnelle (et inversement).

Le programme et les manuels de physique-chimie de Première S adoptent-ils cette interprétation et évitent-ils les confusions évoquées ci-dessus ? Premièrement, le programme et plusieurs manuels n'introduisent pas expressément l'équation $E_0 = mc^2$, et ce faisant, occultent le point (i). Deuxièmement, plusieurs incohérences sur le plan de l'interprétation ont été repérées dans les manuels étudiés : l'idée problématique d'une conversion de masse en énergie est véhiculée par plusieurs manuels et l'idée discutable d'une « équivalence » entre la masse et l'énergie est parfois mentionnée. Troisièmement, le programme et les manuels restreignent la portée de l'équation $E_0 = mc^2$ au domaine des réactions nucléaires et la réduisent à une perspective utilitaire : c'est l'équation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ qui est au centre des contenus à enseigner, laquelle est utilisée pour calculer l'énergie que peut libérer une centrale nucléaire à production d'électricité. Il ne s'agit pas de remettre en question la pertinence d'une entrée par l'étude des réactions

nucléaires. Celle-ci permet d'illustrer la perte de masse qui accompagne toute conversion d'énergie de masse en une autre forme d'énergie – cette perte de masse étant significative dans le cas de réactions nucléaires. Toutefois, il peut être reproché au programme et aux manuels de se limiter à une unique application technologique et de ne pas expliquer la portée universelle de l'équation $E_0 = mc^2$. Faire des exercices d'application de type calculatoire avec l'équation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ ne semble pas suffisant pour assurer un apprentissage profond et durable de celle-ci. On peut supposer qu'il est nécessaire que l'enseignant explicite l'interprétation minimale de l'équation $E_0 = mc^2$ et discute avec ses élèves les interprétations problématiques de celle-ci en termes de conversion et d'équivalence.

Par ailleurs, j'ai constaté qu'aucun des manuels analysés (à une exception près) ne mobilise le principe de conservation de l'énergie dans l'étude des réactions nucléaires en termes énergétiques. Pourtant, l'application de ce principe permet de préciser mathématiquement le lien entre la nouvelle forme d'énergie introduite – l'énergie de masse – et les autres formes d'énergie. Dans le cas des réactions nucléaires, il est ainsi possible d'exprimer quantitativement les conversions d'énergie de masse en énergie cinétique et en énergie électromagnétique. Le principe de conservation peut ainsi contribuer à la fonction d'unification du concept d'énergie et jouer le rôle de pivot entre les différents domaines au programme qui font intervenir le concept d'énergie. Un intérêt de positionner l'enseignement de l'équation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ en Première S est notamment de rendre possible une mise en relation de l'énergie de masse avec les autres formes d'énergie par le biais de ce principe. En outre, étant données les difficultés des élèves à maîtriser ce principe, il semble opportun de se saisir de la possibilité de l'appliquer dans un nouveau contexte pour favoriser son apprentissage (je reviendrai sur ce point dans la prochaine section).

Quant au principe de conservation de la masse, sa remise en cause par l'équation $E_0 = mc^2$ est intégrée dans les contenus qui sont à enseigner selon le programme et les manuels, mais uniquement de manière tacite : à travers la notion de « défaut de masse » ou de « perte de masse ». Or, dans l'enseignement scientifique qui précède la Première S, ce principe est présenté aux élèves comme l'un des fondements de la physique et de la chimie. C'est pourquoi, une discussion de sa remise en cause semble requise pour ne pas laisser les élèves démunis face à des idées en apparence contradiction.

Enfin, s'agissant de l'articulation entre les approches scientifique et sociétale de l'énergie nucléaire, un discours différent à propos de l'énergie est tenu dans chacune de ces approches : en particulier, il est question de conservation de l'énergie dans le premier cas et de production ou de consommation d'énergie dans le second cas. Ce double discours est source de confusions et peut générer un obstacle à l'appropriation du concept scientifique d'énergie. Le programme et les manuels parlent de « production d'énergie électrique », voire de « production d'énergie » sans expliciter le fait que cette expression est entendue dans une perspective non pas scientifique mais utilitaire. De mon point de vue, une articulation bénéfique sur le plan didactique entre les approches scientifique et sociétale requiert *a minima* une clarification en classe de l'existence du double langage et un travail sur la traduction entre ces deux langages. Dans le cas des centrales nucléaires, il s'agit en particulier de traduire la notion de production d'énergie en termes de transformation d'énergie nucléaire en d'autres formes d'énergie. À propos de cette grandeur énergie nucléaire, j'ai constaté qu'une partie seulement des manuels introduit l'expression « énergie nucléaire » et qu'aucun n'en propose une définition. Or, il est largement fait usage de cette expression dans les débats de société liés à l'énergie. La clarification de ce qu'elle désigne

sur le plan scientifique apparaît également comme l'un des réquisits pour envisager une articulation féconde en classe entre les approches scientifique et sociétale de l'énergie nucléaire.

L'analyse transpositive menée dans cette étude appelle à être poursuivie au niveau de la classe, à la fois par une analyse des pratiques des enseignants et par une évaluation des apprentissages des élèves et la mise en lumière des difficultés auxquelles ils peuvent faire face. Cette recherche « sur le terrain » devrait permettre d'affiner et éventuellement de réviser les hypothèses émises concernant l'enseignement des savoirs associés à l'équation $E_0 = mc^2$.

3.6 Hypothèses sur l'apprentissage de l'énergie

Dans la 4^e étape de notre programme de recherche sur l'énergie, l'objectif était d'élaborer une nouvelle stratégie d'enseignement de l'énergie au lycée qui s'appuie sur les travaux de didactique et d'épistémologie menés dans les étapes précédentes. Afin de concevoir et justifier les ingrédients de cette stratégie, nous avons émis plusieurs hypothèses concernant les processus cognitifs associés à l'apprentissage du concept d'énergie. Celles-ci ont été précisées récemment dans un article co-écrit avec Valérie Munier récemment accepté par la revue *Journal of Research in Science Teaching* (Bächtold & Munier, accepté). Selon nous, la compréhension progressive de l'énergie implique pour les élèves de suivre trois voies de développement cognitif qui sont étroitement reliées : progression dans la complexité du réseau conceptuel associé à l'énergie, progression dans la différenciation conceptuelle et imprégnation empirique.

Progression dans la complexité des concepts de forme et de transformation

Cette hypothèse est inspirée de la proposition faite par Neumann et al. (2013, pp. 167-168), laquelle s'appuie sur les travaux de Kauertz and Fischer (2006). Ces derniers distinguent 6 niveaux « plausibles » de complexité décrivant le contenu relatif à un sujet scientifique donné : un fait, plusieurs faits non connectés, une relation (plusieurs faits interconnectés), plusieurs relations non connectées, plusieurs relations connectées, et le concept générique (*ibid.*, pp. 218-219). À propos de l'énergie, Neumann et al. (2013, p. 168) suggèrent que la connaissance des élèves se développe suivant ces 6 niveaux, et ce, successivement pour chacun des concepts spécifiques sous-jacents au concept générique d'énergie : forme, puis transformation et transfert, puis dissipation et conservation. Nous défendons un point de vue légèrement différent sur ce point. Comme je l'ai souligné plus haut (sections 3.3 et 3.4), du point de vue historique, les scientifiques n'ont pas d'abord identifié plusieurs formes d'énergie, avant de découvrir certaines transformations entre celles-ci ; au lieu de cela, ils ont d'abord observé des processus reliant différents types de phénomènes (ex : électricité et mouvement / mouvement et chaleur), avant de les expliquer en termes du changement de forme (de la « transformation ») d'une grandeur conservée identifiée comme étant l'« énergie ». Ce fait historique va à l'appui de l'idée que si l'on ne considère pas des exemples de transformations d'énergie, les formes d'énergie peuvent apparaître simplement comme de nouvelles étiquettes accolées aux phénomènes considérés. Autrement dit, nous supposons que, pour que les élèves acquièrent une compréhension profonde du concept de forme d'énergie, l'enseignant doit introduire le concept de transformation d'énergie et leur permettre de l'appliquer dans plusieurs cas concrets. Nous focalisant sur ces deux notions essentielles, nous proposons de décrire les niveaux de complexité caractérisant leur compréhension comme étant reliés de la manière suivante : un phénomène décrit en termes d'une forme d'énergie, plusieurs phénomènes

non connectés décrits en termes de formes d'énergie, une relation entre plusieurs formes d'énergie (un processus décrit en termes de transformation d'énergie), plusieurs relations non connectées, plusieurs relations connectées, et les concepts génériques de forme et de transformation d'énergie. Selon notre hypothèse, une pleine appropriation du concept générique de forme d'énergie correspond à un point d'aboutissement de cette progression et dépend de l'appropriation conjointe du concept générique de transformation d'énergie.

Une fois que les élèves sont capables de décrire plusieurs phénomènes non connectés en termes de formes d'énergie, il se peut qu'ils soient enclins à « compartimentaliser » ces formes d'énergie, c'est-à-dire à les concevoir comme différentes grandeurs associées à différents domaines de la physique, en contradiction avec l'idée d'énergie comme une grandeur unique (Jewett, 2008, Papadouris & Constantinou, 2016). Un défi à relever par les enseignants consiste alors à guider les élèves vers les étapes de la connaissance toujours plus complexe associée aux formes et transformations d'énergie.

Une autre étape dans la compréhension de l'énergie, basée sur le concept de transformation d'énergie, est celle de la prise de conscience de la fonction d'unification de l'énergie (voir section 3.3). Cette fonction d'unification ne correspond pas tant à un nouveau niveau de complexité qu'à un niveau méta et, plus précisément, à une connaissance d'ordre épistémologique sur l'énergie.

Progression dans la différenciation conceptuelle

L'un des enjeux de l'enseignement de la physique est de conduire les élèves vers une différenciation graduelle de grandeurs qui sont étroitement reliées. En général, au cours des premières années de leur scolarité, les élèves décrivent les phénomènes physiques de manière approximative et qualitative en faisant usage d'un ensemble non-différencié de grandeurs (Viennot, 1996). Parmi les exemples bien connus de grandeurs ainsi amalgamées, on peut mentionner la force et le mouvement en mécanique, le courant et la tension en électricité, ou encore la chaleur et la température en thermodynamique (Driver, Squires et al., 1994, pp. 122, 139, 149). En différenciant progressivement les grandeurs de la physique, les élèves tendent à développer une description des phénomènes plus précise et éventuellement quantitative. Dans le cas de l'énergie, la situation apparaît encore plus compliquée : le concept d'énergie est étroitement relié à plusieurs autres grandeurs telles que la force, la température, la puissance..., mais il correspond lui-même à un concept complexe sous lequel plusieurs concepts spécifiques (ou sous-catégories) sont subsumés, à savoir les concepts de source, forme, transformation, transfert, dissipation et conservation de l'énergie. Nous faisons ainsi l'hypothèse que l'apprentissage de l'énergie implique un double processus de différenciation progressif : entre l'énergie et les grandeurs reliées, et entre les concepts spécifiques associés au concept général d'énergie.

Concernant les grandeurs force et énergie, il a été indiqué plus haut (section 3.2) que la confusion entre ces deux grandeurs est en fait symptomatique d'une confusion plus profonde entre deux types de descriptions possibles en physique : une description en termes d'énergie qui peut être transformée et/ou transférée d'un système à un autre ; une description en termes de forces agissant sur un système donné et de conséquences de ces forces sur l'état du système. À cet égard, l'enjeu est donc d'amener les élèves à différencier non seulement les deux grandeurs mais aussi les deux types de descriptions qui leurs sont associés.

Une autre distinction importante que les élèves doivent parvenir à opérer est celle entre la conservation de l'énergie mécanique, qui est une propriété contingente pour une forme spécifique d'énergie, et la conservation de l'énergie, qui est admise en physique comme une

propriété universelle de l'énergie. Nous faisons l'hypothèse que la différenciation entre les deux types de conservation est requise pour que les élèves reconnaissent le statut de principe de la conservation de l'énergie.

Imprégnation empirique

Pour rendre possible la progression des élèves dans la connaissance toujours plus complexe de l'énergie et dans la double différenciation conceptuelle décrite ci-dessus, nous supposons qu'il est essentiel de les confronter à des situations physiques nombreuses et variées, afin de permettre une imprégnation empirique. Nous nous appuyons ici sur la modélisation par Vygotski (1997 [1934]) de l'apprentissage des « concepts scientifiques », lesquels sont décrits comme des constructions socio-culturelles transmises par les adultes : les élèves commencent par faire face à des « définitions verbales » générales et abstraites (et/ou à des définitions mathématiques, dans le cas de la physique) ; puis, pour donner du sens à ces définitions, ils doivent construire des connections avec une variété de situations concrètes qui vont les imprégner empiriquement (je reviendrai sur ce point dans la partie 4). L'énergie étant un concept « transphénoménologique » (Bécu-Robinault et Tiberghien, 1998, p. 101), c'est-à-dire un concept qui renvoie à de multiples domaines phénoménologiques, on peut penser que l'étude de deux ou trois phénomènes n'est pas suffisante pour garantir l'appropriation et la différenciation des concepts associés à l'énergie. Ces concepts s'appliquant à une multiplicité de domaines, il convient selon nous de multiplier d'autant les situations physiques étudiées avec les élèves. Autrement dit, le répertoire empirique permettant aux élèves de donner sens à ce réseau conceptuel doit être d'autant plus riche.

3.7 Une stratégie d'enseignement de l'énergie basée sur l'histoire des sciences et l'épistémologie

Venons-en à la stratégie d'enseignement de l'énergie au lycée (en Première S) développée et expérimentée par notre équipe. Dans ce qui suit, je vais présenter successivement : le rôle de l'histoire des sciences et de l'épistémologie dans cette stratégie ; la méthode collaborative et itérative mise en œuvre ; les principaux ingrédients de cette stratégie justifiés à la lumière des hypothèses concernant l'apprentissage de l'énergie ; la méthode pour l'évaluer et les principaux résultats ; la discussion de ces résultats.

Le rôle de l'histoire des sciences et de l'épistémologie

Comme indiqué plus haut (section 3.2), nous supposons que l'histoire et la philosophie des sciences permettent de nourrir la réflexion sur l'enseignement de l'énergie, dans la mesure où elles nous aident à mieux comprendre la signification de ce concept et son rôle en physique. Nous suivons ainsi plusieurs auteurs qui se sont appuyés sur l'histoire des sciences et l'épistémologie pour faire des propositions nouvelles concernant l'enseignement de l'énergie (de Berg, 1997, Coelho, 2009, 2014, Cotignola, et al., 2002, Papadouris & Constantinou, 2011, 2016, Rizaki & Kokkotas, 2013). Ainsi, par exemple, Rizaki et Kokkotas (2013) ont développé une approche didactique pour l'école primaire basée sur une « analyse historiographique ». On peut mentionner également Papadouris et Constantinou (2011, 2016) qui ont proposé des séquences d'enseignement « éclairées philosophiquement » pour l'équivalent du collège (*middle school*). Dans les deux cas, ces auteurs ont mis en avant le rôle unificateur du concept d'énergie.

Nous faisons en outre l'hypothèse que l'histoire des sciences et l'épistémologie peuvent être introduites et utilisées directement dans les classes pour favoriser l'apprentissage des élèves. À cet égard, nous avons cherché à développer ce que de Hosson (2011, p. 34) nomme une « reconstruction didactique », c'est-à-dire « 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 ». L'approche qui sous-tend une telle reconstruction, selon de Hosson, s'appuie sur une analyse épistémologique des connaissances à enseigner et un examen des difficultés des élèves ; elle conduit à la sélection et à l'organisation de supports historiques supposés contribuer à l'apprentissage des connaissances visées. Il convient de souligner qu'une telle reconstruction s'écarte de celles que pourraient proposer des historiens des sciences. Bien qu'il s'agisse de replacer les expériences et les développements théoriques dans leur contexte historique, le focus du dispositif didactique peut différer de celui qui a historiquement occupé l'esprit des scientifiques ; la reconstruction historique pour la classe peut aussi négliger certains détails expérimentaux ou mathématiques (de Berg, 1997, p. 526). Pour autant, nous faisons l'hypothèse que les expériences et les notions scientifiques introduites en classe peuvent avoir davantage de significations pour les élèves si elles sont situées dans leur contexte historique et si elles sont présentées comme des moyens pour tenter de résoudre des problèmes auxquels les scientifiques étaient effectivement confrontés dans l'histoire des sciences. Comme le soutient Matthews (1994, p. 50), « l'histoire favorise une meilleure compréhension des concepts et méthodes scientifiques ». Fournir aux élèves des informations historiques concernant la manière dont l'énergie a été introduite et définie dans le milieu du XIX^e siècle apparaît comme une piste intéressante pour les aider à cerner la signification de ce concept, ou autrement dit, pour étudier avec eux « la question épistémologique fondamentale "qu'est-ce que l'énergie, pourquoi est-elle utile et comment l'utilisons-nous ?" » (Papadouris & Constantinou, 2016, p. 121).

Une recherche collaborative et itérative

La stratégie d'enseignement a été élaborée dans le cadre d'une recherche collaborative et itérative :

- *Collaborative* au sens où la recherche a été menée par une équipe impliquant des chercheurs et des enseignants du lycée, afin de construire une séquence qui fasse sens pour les enseignants, qui ne soit pas en rupture avec leurs pratiques usuelles, qui soit adaptée à leurs élèves et qui soit compatible avec les contraintes de l'institution scolaire ;
- *Itérative* au sens où la stratégie a été appliquée dans les classes, évaluée et réajustée au cours de deux boucles d'expérimentations, permettant des ajustements et ainsi un perfectionnement de celle-ci.

Nous avons opté pour une méthode d'« ingénierie didactique », non pas classique (Artigue, 1989), mais de « seconde génération » (Perrin-Glorian, 2011). Dans la méthode classique, les chercheurs s'efforcent de contrôler autant que possible l'application de la séquence telle qu'elle a été conçue par eux, ne laissant pas de marge de manœuvre aux enseignants. Plusieurs études, notamment en didactique des mathématiques, ont montré qu'une telle méthode ne permet pas aux enseignants de s'approprier pleinement la séquence conçue et peut générer des incompréhensions (Robert, 2008). Dans une ingénierie didactique de seconde génération, au contraire, le point de vue des enseignants est pris en compte et la séquence est mise en œuvre à plusieurs reprises pour favoriser son appropriation par les enseignants et permettre des adaptations. Une telle méthode est similaire à ce qui est aussi appelé « *design experiment* », méthode basée sur des cycles itératifs de conception et d'analyse impliquant une équipe de chercheurs et d'enseignants (Cobb et al., 2003, diSessa & Cobb, 2004, Sandoval, 2013). L'objectif d'une telle méthode est

à la fois d'« améliorer la pratique et d'affiner la théorie » (Sandoval, 2013, p. 389) : d'une part, elle permet de développer des ressources pédagogiques que les enseignants seront plus enclins à utiliser ; d'autre part, elle offre l'opportunité de recueillir de nombreuses données dans le contexte authentique de la classe, et ainsi de tester et développer de nouvelles modélisations des processus d'enseignement et d'apprentissage. C'est dans cette double optique que nous avons privilégié une telle méthode : afin de développer une stratégie d'enseignement de l'énergie qui soit viable et reproductible, et afin de tester notre stratégie et les hypothèses d'apprentissage sous-jacentes.

Plus concrètement, l'équipe de recherche que j'ai coordonnée a rassemblé 5 chercheurs¹ et 3 enseignants la première année en 2014-2015², puis 2 enseignants poursuivant le projet la seconde année en 2015-2016 – ces enseignants ayant des classes de Première S. En amont de ces travaux, j'avais observé l'un des enseignants du projet dans sa classe lors d'une séquence d'enseignement de l'énergie (avec captation vidéo), afin de pouvoir prendre en compte des éléments de sa pratique usuelle. Durant les deux années d'expérimentation de notre stratégie d'enseignement, notre équipe s'est réunie à 13 reprises (8 fois l'année 1 / 5 fois l'année 2). Au cours de ces réunions :

- Nous avons apporté aux enseignants des éléments d'histoire des sciences, d'épistémologie et de didactique concernant l'énergie ;
- Nous leur avons présenté en détail la stratégie d'enseignement et discuté avec eux son application possible en classe ; dès la première année, les enseignants ont fait des propositions concrètes concernant les outils didactiques et les activités destinées aux élèves ;
- À la fin de chaque année, nous avons analysé collectivement (notamment en visionnant des extraits de vidéos de classe) des points clés de la stratégie afin de discuter leur pertinence et d'envisager des ajustements.

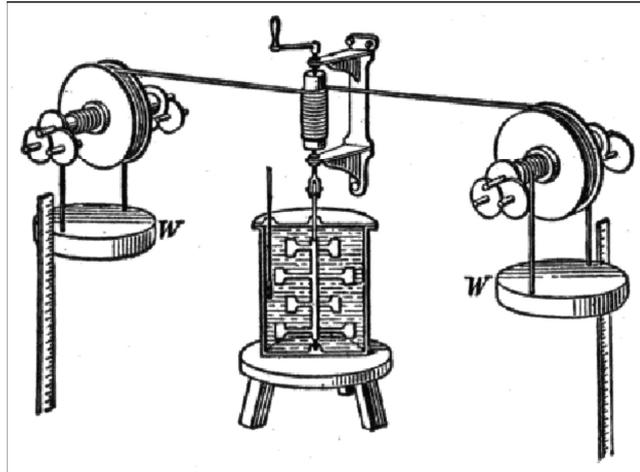
Les principaux ingrédients de la stratégie d'enseignement

Ingrédients associés à la progression dans la complexité des concepts de forme et de transformation : Afin de guider les élèves dans leur cheminement vers une complexification de leur connaissance liée aux concepts de forme et de transformation d'énergie, notre stratégie se base sur 3 ingrédients. Les deux premiers sont issus de l'histoire des sciences et interviennent dans la même séquence.

Le premier ingrédient correspond à une expérience réalisée par Joule dans les années 1840 dans laquelle la chute de poids provoque l'augmentation de la température d'une certaine quantité d'eau (Joule, 1847b, voir figure 1). Après une contextualisation historique (voir plus loin), l'enseignant présente et décrit l'expérience avec ses élèves, d'abord sans le concept d'énergie, puis en termes de transformation d'énergie. Les élèves doivent ensuite concevoir une expérience similaire (avec du matériel facilement disponible en classe de physique), la réaliser, présenter et discuter les résultats. Le principe de cette expérience est simple à comprendre et sa description en termes de transformation d'énergie permet de conceptualiser un lien entre deux domaines de la physique (la mécanique et la thermodynamique) qui sont habituellement étudiés de façon séparée au lycée. Nous faisons l'hypothèse que cette expérience peut favoriser chez les élèves une compréhension plus profonde de l'idée de transformation d'énergie et peut éventuellement les aider à prendre conscience du rôle unificateur du concept d'énergie.

¹ Valérie Munier, Muriel Guedj, Alain Lerouge, André Ranquet et moi-même.

² Delphine Ferran-Broussous, Régis Galmitche et Pierre Méjean.



Source : <http://gutenberg.readingroo.ms/3/8/3/8/38384/38384-h/38384-h.htm>

Figure 1 – L'expérience de Joule avec les palets (1847b)

Dans cette expérience (connue comme l'expérience établissant l'« équivalent mécanique de la chaleur »), la chute de deux poids entraîne la rotation d'une manivelle et de palets dans un récipient rempli d'eau, provoquant ainsi l'augmentation de la température de l'eau.

Le second ingrédient correspond à la définition de l'énergie de Rankine (comme la capacité d'un système à produire des changements). Celle-ci est introduite par l'enseignant et discutée avec les élèves en lien avec l'expérience de Joule (le « changement » étant, dans ce cas, l'augmentation de la température de l'eau), mais aussi en lien avec les autres cours ayant porté sur l'énergie durant l'année scolaire (permettant de mentionner d'autres « changements » tels que la mise en mouvement, le changement d'état ou encore l'émission de lumière). Bien qu'elle soit abstraite, cette définition constitue la seule définition de l'énergie qui soit disponible et qui puisse offrir un substitut aux conceptions erronées des élèves, lesquelles risquent autrement de persister. En outre, cette définition est valide dans les différents domaines de la physique, ce qui nous fait supposer qu'elle peut aider les élèves à dépasser la compartimentisation des formes d'énergie (voir la section précédente), laquelle fait obstacle à une pleine compréhension de la notion de transformation d'énergie.

Le troisième ingrédient correspond à ce que nous avons appelé la « carte d'identité de l'énergie », c'est-à-dire une carte conceptuelle déjà structurée (voir figure 2) que les élèves doivent remplir au cours de l'année scolaire, donnant l'occasion de discuter les nouveaux aspects de l'énergie introduits en relation avec ceux étudiés dans des cours précédents. En particulier, nous faisons l'hypothèse que cet outil peut aider les élèves à intégrer les formes et les transformations d'énergie qui mettent en relation les phénomènes nombreux et variés rencontrés au cours de l'année scolaire. Comme l'ont montré plusieurs études sur les cartes conceptuelles (Nesbit & Adescope, 2006), ces dernières permettent de rendre explicite la structure des connaissances et mettre en lumière le réseau conceptuel mis en jeu. Complétée progressivement au cours de l'année par les élèves, la carte d'identité de l'énergie leur offre un moyen pour cheminer dans la complexification de la connaissance associée aux formes et aux transformations d'énergie.

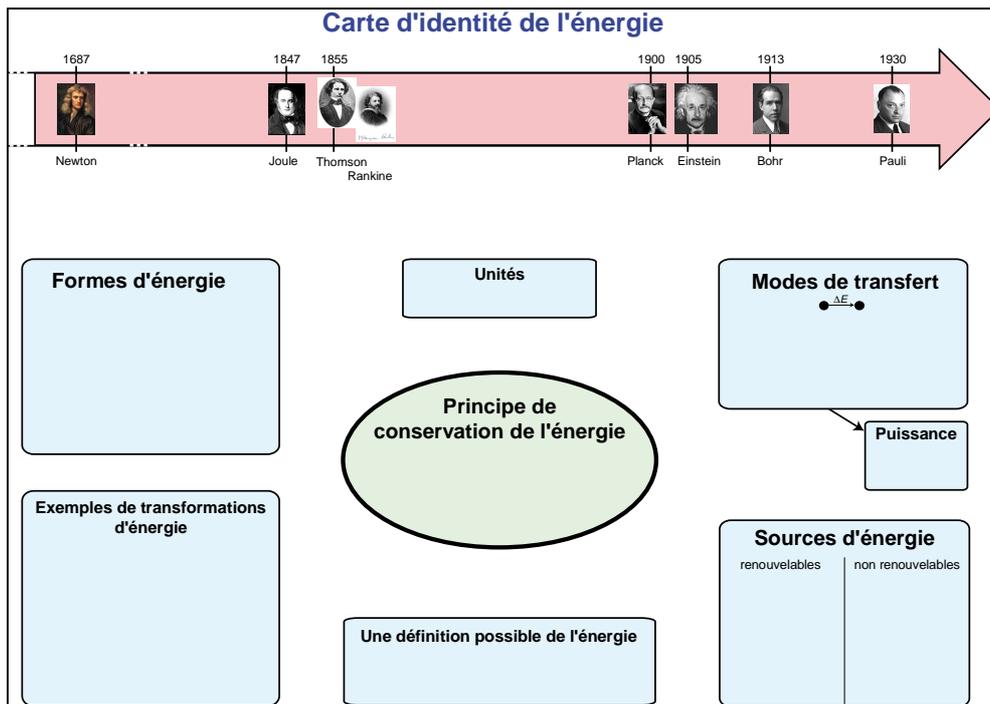


Figure 2 – Carte d'identité de l'énergie

Ingrédients associés à la progression dans la différenciation conceptuelle : Nous faisons l'hypothèse que la carte d'identité de l'énergie constitue également un support visuel simple pour aider les élèves à lister, comparer et classer les nombreuses sous-catégories du concept d'énergie. Rappelons que de nombreuses confusions sont faites par les élèves entre les sources et les formes d'énergie (ex : l'énergie solaire ou hydraulique considérées comme des formes d'énergie) et entre les formes et les modes de transfert d'énergie (ex : le travail et la chaleur considérés comme des formes d'énergie). La carte d'identité de l'énergie vise en particulier à guider les élèves dans la différenciation de ces deux couples de concepts.

Pour favoriser la différenciation entre force et énergie et entre les deux types de description corrélatives, nous avons conçu une activité centrée sur l'étude d'un texte historique de Joule, à savoir un extrait de l'article « *On matter, living force, and heat* » (Joule, 1847a) que nous avons traduit. Dans ce texte, Joule décrit la « force vive » (l'ancêtre de l'énergie cinétique) comme « une force que possède un corps en mouvement » et la définit mathématiquement comme étant proportionnelle à la masse du corps et à sa vitesse au carré. Ce texte montre que, à l'époque de Joule, force et énergie ne sont pas clairement distinguées. L'activité vise à mettre en lumière la différence entre ces deux grandeurs et à souligner le fait que l'énergie est la propriété d'un système, tandis que la force modélise une interaction entre deux systèmes. À noter que ce texte est également un moyen de présenter le contexte historique dans lequel Joule a réalisé son expérience avec les palets : l'état des sciences à cette époque (étude de nouveaux phénomènes et inventions techniques), le problème scientifique auquel Joule faisait face (l'apparente disparition de force vive) et la solution qu'il a proposé (décrire la force vive comme pouvant se convertir en chaleur et montrer la possibilité de cette conversion par des expériences).

S'agissant de la différenciation entre la conservation de l'énergie mécanique et la conservation de l'énergie, nous avons proposé lors de la seconde année de l'expérimentation d'introduire le principe de conservation de l'énergie dès le début de l'année scolaire (lorsque la grandeur énergie est rencontrée pour la première fois) en

soulignant ce que signifie le terme « principe » (à savoir, qu'un principe se situe au fondement de la physique et qu'il est considéré comme étant toujours vrai). Ainsi, la conservation pourrait plus clairement apparaître aux élèves comme une propriété fondamentale de l'énergie qui ne peut pas être remise en cause (par contraste avec l'énergie mécanique) et qui est valide dans tous les domaines de la physique.

Ingrédients associés à l'imprégnation empirique : De fait, dans les programmes français, les formes, transformations et transferts d'énergie sont à étudier à nombreuses reprises à différents niveaux de la scolarité, offrant aux élèves l'occasion de manipuler ces concepts en lien avec de nombreuses situations. Cependant, il n'en va pas ainsi pour le principe de conservation de l'énergie, ni pour la notion de dissipation de l'énergie. C'est pourquoi, la stratégie d'enseignement que nous avons développée pour la Première S consiste aussi à faire appliquer aux élèves ces contenus à de nombreux types de phénomènes étudiés tout au long de l'année scolaire (phénomènes mécaniques, réactions nucléaires et production d'électricité), et ce, de façon conjointe, car conservation et dissipation peuvent difficilement être compris indépendamment (voir plus haut). L'expérience de Joule constitue une opportunité supplémentaire d'appliquer ces deux notions et de ne pas réduire le principe de conservation à un principe de la mécanique.

Méthode d'évaluation de la stratégie et principaux résultats

Dans ce qui suit, je vais présenter de façon synthétique la méthode pour évaluer la stratégie et les résultats obtenus lors de la seconde année de l'expérimentation avec les élèves dans 1 classe d'un enseignant (Pierre) et 2 classes d'un autre enseignant (Régis). Ces deux points sont développés dans l'article mentionné plus haut (Bächtold & Munier, accepté) et dans un chapitre d'ouvrage à paraître (Bächtold & Munier, accepté). Les résultats de la première année de l'expérimentation sont présentés dans un article publié dans les actes du colloque *GIREP-EPEC 2015* (Bächtold, Munier, Guedj, Lerouge & Ranquet, 2016).

Une stratégie d'enseignement de l'énergie élaborée à la lumière de l'histoire des sciences et de l'épistémologie et introduisant des éléments d'histoire des sciences dans la classe aide-t-elle les élèves du lycée à mieux comprendre le concept d'énergie, la notion de transformation d'énergie et le principe de conservation de l'énergie ? Afin d'évaluer la stratégie et en particulier de tenter de répondre à cette question, nous avons soumis aux élèves un questionnaire au début de l'année scolaire (pré-test) et un second questionnaire à la fin de l'année scolaire (post-test). Les deux questionnaires étaient composés de 5 questions communes permettant d'apprécier l'évolution des connaissances des élèves. Le questionnaire de fin d'année était composé de 6 questions supplémentaires reprises du questionnaire de Neumann et al. (2013) afin de comparer les connaissances des élèves ayant été exposés à notre stratégie et celles d'élèves ayant été exposés à un enseignement traditionnel (données de Neumann et al., 2013). Pour éclairer ces résultats, nous avons également recueilli des données relatives à la mise en œuvre de la stratégie dans les classes : captations vidéo dans 2 des 3 classes suivies de la séquence dite « de Joule-Rankine » introduisant des éléments d'histoire des sciences (4h05 dans la classe de Pierre et 4h57 dans la classe de Régis), vidéos produites par les groupes d'élèves de l'expérience qu'ils ont réalisée en reprenant le principe de celle de Joule (15 vidéos d'environ 2 minutes en moyenne) et enregistrement audio des retours des 2 enseignants lors de la dernière réunion de travail (1h57) donnant des informations complémentaires sur les autres séquences portant sur l'énergie au cours de l'année.

Du retour des enseignants, il ressort en particulier que le principe de conservation de l'énergie a bien été introduit au début de l'année et a été appliqué à plusieurs reprises, mais

pas autant de fois que ce qui était planifié. La carte d'identité de l'énergie a été introduite par les enseignants non pas dès le début de l'année, comme prévu, mais vers le milieu de l'année. Elle a été remplie par les élèves de façon collective avec l'enseignant, dans le cas de Pierre, et de façon individuelle en version numérique, dans le cas de Régis.

S'agissant des vidéos prises de la séquence de Joule-Rankine, nous avons cherché des éléments indicatifs sur la manière dont les élèves ont appréhendé les trois autres ingrédients de la stratégie. Concernant l'expérience de Joule et la définition de Rankine, nous avons analysé les échanges oraux qui ont porté directement sur ces deux éléments (lors de leur introduction et lors de la correction collective d'un exercice sur l'expérience de Joule avec des calculs à effectuer). Nous avons élaboré une grille d'analyse distinguant 4 niveaux de conceptualisation de l'expérience de Joule en termes d'énergie :

- Niveau matériel : description de l'expérience de Joule en termes de ses éléments matériels ;
- Niveau phénoménologique : description en termes de variations de grandeurs (telles que la vitesse et la température) – ces variations étant soit non connectées, soit connectées (description en termes de co-variations) ;
- Niveau semi-conceptuel : description en termes de formes d'énergie, sans les notions de transformation, de transfert d'énergie et sans la définition de Rankine ;
- Niveau conceptuel : description en termes de transformation d'énergie ou de transfert d'énergie ou de la définition de Rankine (c'est-à-dire : description se référant aux changements ou effets qu'un système peut produire en vertu de son énergie).

Les résultats de l'analyse sont similaires dans les 2 classes. Il apparaît que les interventions des élèves et des enseignants sont présentes de façon significative dans les 4 niveaux (entre 15 et 37 interventions), ce qui permet aux élèves de baser leur compréhension du niveau phénoménologique sur le niveau matériel, mais aussi de baser leur compréhension du niveau conceptuel sur le niveau phénoménologique. Au niveau matériel, les élèves étaient capables d'identifier facilement les principaux éléments du mécanisme de l'expérience. Au niveau phénoménologique, ceux qui sont intervenus n'ont eu aucune difficulté à interpréter le mécanisme en termes d'une chaîne causale mettant plusieurs grandeurs en relation. Enfin, au niveau conceptuel, les trois types de descriptions (en termes de transformation d'énergie, de transfert d'énergie et de la définition de Rankine) sont utilisés par les élèves, ce qui suggère qu'ils participent conjointement à la conceptualisation du processus physique en jeu dans l'expérience. L'expérience de Joule semble ainsi être une bonne occasion d'appliquer la notion de transformation d'énergie et de lui donner sens. Il en va de même pour la notion de transfert d'énergie. Quant à la définition de Rankine, elle semble avoir joué un rôle significatif dans la conceptualisation du processus physique, alors qu'on pourrait craindre qu'elle soit trop abstraite pour être mobilisée. Il convient toutefois de noter que cette définition n'est pas appliquée de façon complète par les élèves : ils ne spécifient pas quel est le système qui a de l'énergie et produit les changements ; au lieu de cela, ils mettent en avant la relation entre l'énergie transférée et les changements produits.

Dans l'analyse des vidéos prises lors de la séquence de Joule-Rankine, nous avons aussi cherché des éléments indicatifs sur la manière dont les élèves ont appréhendé le texte historique et sur le travail associé qui visait à clarifier la distinction entre les grandeurs énergie et force. Globalement, aucune intervention n'indique que les élèves ont des difficultés à comprendre le texte ou à l'exploiter pour répondre aux questions prévues pour guider son étude. Dans les deux classes, les critères de distinction un système/deux

systèmes et propriété/interaction ont été explicités et utilisés dans les échanges, quoique dans un nombre très limité d'interventions côté élèves (1 à 3 interventions d'élèves pour chaque critère dans chaque classe). Dans la classe de Régis uniquement, les unités (Joule, Wh, eV... / Newton) ont également été discutées comme un élément distinctif.

Tournons-nous maintenant vers les principales données, celles issues des questionnaires. Voici un bref descriptif des questions et des points évalués (les grilles d'analyse pour chaque question figurant directement dans les tableaux des résultats ci-dessous) :

- Question 1 : les élèves doivent décrire en termes d'énergie la situation représentée par une main qui tourne la manivelle d'une lampe torche. Cette question vise à évaluer si les élèves sont capables de décrire la situation en termes de formes et de transformations d'énergie et s'ils font des confusions sources/formes ou formes/modes de transfert d'énergie.
- Question 2 : il est demandé aux élèves de donner les unités d'énergie qu'ils connaissent, afin de voir s'ils ne confondent pas l'énergie avec d'autres grandeurs.
- Question 3 : les élèves doivent expliquer pourquoi selon eux l'énergie est omniprésente dans le programme de Première S. Ici, nous cherchons à savoir si les élèves mentionnent ou non spontanément le rôle unificateur de l'énergie.
- Questions 4 et 5 : il est demandé aux élèves d'expliquer ce qu'est l'énergie et quelles sont ses propriétés. Il s'agit de voir si la définition de Rankine ressort spontanément, si l'énergie est clairement associée à un système, si la conservation et l'idée de transformation sont mentionnées, et si une confusion entre énergie et force apparaît.
- Question 6 : il est rappelé aux élèves que, dans la vie quotidienne, on emploie souvent les expressions « production » et « consommation » d'énergie. Les élèves doivent alors dire et justifier si, du point de vue de la physique, l'énergie peut être produite (au sens de créée) ou consommée (au sens de détruite). L'objectif de cette question est de déterminer si les élèves sont capables de traduire correctement ces expressions en termes de transformation et de dissipation d'énergie et quel statut ils assignent au principe de conservation.
- Questions 7 à 11 : deux situations différentes sont présentées aux élèves, celle d'une boule qui est retenue puis lâchée sur la surface intérieure d'un bol et celle d'une éolienne qui produit de l'électricité. Les questions posées sont à choix multiples et visent à déterminer si les élèves sont capables d'identifier les formes d'énergie en jeu sans confusion, de décrire correctement les transformations d'énergie en jeu et d'appliquer correctement les notions de conservation et de dissipation d'énergie en identifiant le système pertinent.

	Situation physique	Notions et compétences évaluées	Réponses au pré-test (N=95)	Réponses au post-test (N=87)	
Q1	Une lampe torche à manivelle	Notion de transformation d'énergie Identification des différentes formes d'énergie	Description avec une idée claire de transformation	26%	54%
			Evolution significative ($\chi^2=14.58$)		
			Description sans la notion de transformation d'énergie ou la notion même d'énergie	58 %	41 %
			Evolution significative ($\chi^2=4.95$)		
			Description d'une partie de la chaîne énergétique	33%	45%
			Evolution non significative ($\chi^2=2.85$)		
			Description complète de la chaîne	2%	14%
			Confusion entre formes et sources d'énergie	2%	8%
			Confusion entre formes and modes de transfert d'énergie	0%	8%
Q2	/	Unités d'énergie	Une (ou plus) unité(s) d'énergie sans unité incorrecte	7%	39%
			Evolution significative ($\chi^2=26.17$)		
			Présence d'unités incorrectes	91%	61%
			Evolution significative ($\chi^2=22,06$)		
			Confusion avec la force (unité : Newton)	11%	7%
			Evolution non significative ($\chi^2=0.75$)		
			Confusion avec la puissance (unité : Watt)	57%	49%
			Evolution non significative ($\chi^2=1.00$)		
			Q3		Rôle unificateur de l'énergie
Evolution non significative ($\chi^2=3.75$)					
Q4 et Q5		Définition de l'énergie Rôle unificateur de l'énergie Notion de transformation d'énergie Principe de conservation	Energie associée à un système	2%	34%
			Evolution significative ($\chi^2=32.85$)		
			Définition de Rankine	1%	32%
			Evolution significative ($\chi^2=32,86$)		
			Définition de Rankine ou une version modifiée mais acceptable (ex : avec l'idée de capacité)	5%	39%
			Evolution significative ($\chi^2=30,85$)		
			Version modifiée de la définition de Rankine qui en perd la signification (ex : sans l'idée de capacité)	1%	9%
			Evolution significative ($\chi^2=6,41$)		
			Idée de transformation	23%	48%
			Evolution significative ($\chi^2=12.57$)		
			Principe de conservation	5%	53%
			Evolution significative ($\chi^2=51.04$)		
			Confusion entre énergie et force	13%	25%
			Evolution significative ($\chi^2=4.79$)		

Tableau 2 – Réponses des élèves aux questions 1 à 5 du pré-test et post-test

	Situation physique	Notions et compétences évaluées	Réponses au post-test (N=87)	Résultats issus de Neumann et al. (2013) (données transmises par communication privée)
Q6	/	« Production/consommation » d'énergie interprétées en termes de transformations d'énergie Conservation de l'énergie considérée comme n'étant pas toujours valide	61% 20%	/ /
Q7	Une boule tenue en haut d'un bol	Formes d'énergie cinétique et potentielle Confusion entre énergie et mouvement	86% 0%	45% /
Q8	Une boule roulant dans un bol	Notion de transformation d'énergie Confusion entre énergie et puissance Confusion entre énergie et force	88% 2% 6%	48% / /
Q9		Principe de conservation avec identification du système pertinent Confusion entre conservation d'énergie et conservation d'énergie mécanique	37% 16%	20% /
Q10	Une éolienne générant de l'électricité	Identification de plusieurs formes d'énergie et notion de transformation d'énergie Confusion entre énergie et force Confusion entre énergie électrique et électricité	42% 35% 17%	49% / /
Q11		Principe de conservation et notion de dissipation Confusion entre énergie et force	51% 38%	31% /

Tableau 3 – Réponses des élèves aux questions 6 à 11 du post-test comparées avec celles données par Neumann et al. (2013)

Discussion des résultats

Je donnerai ici les principaux éléments de discussion (renvoyant à l'article mentionné ci-dessus pour une discussion plus développée). La stratégie d'enseignement que nous avons expérimentée favorise-elle chez les élèves du lycée un meilleur apprentissage du *concept d'énergie* ? Après enseignement, environ la moitié des élèves sont capables de donner une définition correcte de l'énergie, proche de celle de Rankine, en dépit de son caractère abstrait. Le fait qu'ils reformulent la définition dans leurs propres mots, même si c'est parfois de façon maladroite, montre que cette définition est à leur portée et suggère que sa compréhension n'est pas superficielle. Celle-ci apparaît bien comme un moyen de donner une signification au concept d'énergie, de dépasser les conceptions erronées initiales et d'éviter le problème de la compartimentalisation. De plus, un nombre significatif d'élèves associe l'énergie à un système, point positif qui pourrait être mis en partie au crédit de l'introduction de cette définition.

Concernant la confusion énergie-force, les résultats sont plus mitigés. En fonction de la situation, cette confusion ressort plus ou moins, montrant que les deux grandeurs ne sont pas clairement distinguées pour environ un tiers des élèves. À cet égard, le texte historique semble être un outil intéressant mais qui a peut-être des effets contre-productifs pour des élèves avec un faible niveau.

Des confusions sources-formes et formes-modes de transfert d'énergie subsistent. L'apport de la carte d'identité de l'énergie apparaît limité sur ce point. Il en va de même concernant la prise de conscience du caractère unificateur de l'énergie, bien que les

enseignants aient pointé dans nos réunions le « rôle de liant » de cette carte conceptuelle, qui est très utile de leur point de vue pour mettre en lien les différentes parties du programme. Ce résultat négatif côté élèves peut être nuancé par un possible biais méthodologique (dû à la possibilité de réponses acceptables qui ne témoignent pas d'une conscience du rôle unificateur). En outre, il est fort possible que la prise de conscience de ce point nécessite une discussion d'ordre épistémologique qui soit explicite, ce que ne nous n'avions pas prévu et qui n'a pas été mis en œuvre en classe.

La stratégie d'enseignement favorise-elle un meilleur apprentissage de la *notion de transformation d'énergie* ? Sur ce point, les données sont concluantes : une large proportion d'élèves est capable d'identifier et de distinguer correctement plusieurs formes d'énergie et d'appliquer correctement la notion de transformation d'énergie dans des situations variées. C'est le cas en particulier lorsqu'il est question d'énergie cinétique et potentielle. Les résultats sont moins significatifs avec l'énergie électrique, une forme d'énergie ayant été moins étudiée durant la scolarité et sujet à controverse chez les scientifiques.

Nous pouvons en conclure que la séquence centrée sur l'expérience de Joule a un rôle important pour la compréhension de cette notion de transformation d'énergie. Cette expérience fournit un exemple de transformation d'énergie très parlant, qui rend cette notion compréhensible et qui permet de mettre en lien deux domaines de la physique habituellement séparés dans l'enseignement. Cette expérience peut constituer un exemple paradigmatique pour élèves. Une séquence basée sur cette expérience peut favoriser le cheminement cognitif des élèves vers une connaissance de complexité croissante : d'une connaissance « factuelle » et « fragmentée » vers une connaissance caractérisées par des « connexions spécifiées » (Neumann et al., 2013), autrement dit, d'une connaissance de formes d'énergie isolées vers une connaissance de transformations d'énergie impliquant la conceptualisation de connexions entre des formes d'énergie variées.

Enfin, la stratégie d'enseignement favorise-elle un meilleur apprentissage du *principe de conservation de l'énergie* ? À cet égard, la comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par Neumann et al. (2013) montre que cette stratégie est plus efficace qu'un enseignement classique. Elle semble aider les élèves à appliquer correctement le principe de conservation de l'énergie, sans le confondre avec la conservation de l'énergie mécanique, en prenant en compte la dissipation et en identifiant le système pertinent. L'ingrédient qui apparaît comme déterminant est celui qui consiste à introduire le principe de conservation de l'énergie au début de l'année, en clarifiant le statut de principe, et en faisant appliquer aux élèves le principe à plusieurs reprises au cours de l'année. Cette approche semble favoriser chez les élèves l'imprégnation empirique du principe et le développement de leurs capacités à l'appliquer correctement dans de nouvelles situations.

3.8 Bilan et perspectives sur l'enseignement de l'énergie

Les apports de l'histoire des sciences et de l'épistémologie

Les résultats positifs obtenus lors de l'expérimentation de notre stratégie d'enseignement de l'énergie en Première S tendent à montrer la fécondité d'une approche qui s'appuie sur l'histoire des sciences et l'épistémologie. D'une part, les éclairages de l'histoire des sciences et l'épistémologie nous ont aidés à mieux comprendre la signification et le rôle du concept d'énergie : en particulier, sa fonction unificatrice, l'importance de la notion de transformation d'énergie et le rôle de la définition de Rankine. Ce faisant, ils nous ont conduits à développer de nouvelles stratégies et de nouveaux outils didactiques, dont

plusieurs ont des effets qui se sont révélés positifs : carte d'identité de l'énergie, focus sur la notion de transformation d'énergie et introduction de la définition de Rankine.

D'autre part, ces résultats montrent que l'histoire des sciences constitue, dans une perspective didactique, un *réservoir d'expériences* qui peuvent être étudiées voire reproduites dans les classes et favoriser les apprentissages de certaines connaissances. Ce point a été mis en avant par Gauld (2014, p. 80) qui estime que les expériences plus anciennes sont plus propices à une exploitation en classe car généralement plus simples. L'expérience de Joule que nous avons mise au cœur de notre séquence d'enseignement se distingue justement par sa simplicité, mais aussi par son caractère très convaincant : pour illustrer la notion de transformation et pour opérer un rapprochement entre différents domaines de la physique, mais aussi pour appliquer les notions de conservation et de dissipation.

Précisons quel type de réplcation d'expérience historique est à envisager dans la perspective de l'enseignement de la physique. Suivant la classification proposée par Chang (2011), on peut distinguer deux types de « réplcations » d'expériences : les « réplcations historiques », qui sont réalisées dans les conditions les plus proches possibles des conditions historiques ; les « réplcations physiques », qui sont réalisées sans un souci de coller exactement aux conditions historiques, dans l'idée essentiellement de reproduire les phénomènes tels qu'ils étaient créés dans les expériences historiques. Tandis que les réplcations historiques visent à apporter une meilleure compréhension des connaissances mobilisées par les scientifiques de l'époque et de la temporalité du processus de réalisation de l'expérience, les réplcations physiques visent à apporter une connaissance supplémentaire ou différente de celles des sciences actuelles. Dans la perspective de l'enseignement de la physique, c'est bien d'une « réplcation physique » dont il est question. La reproduction à l'identique des conditions physiques de l'époque n'a pas forcément d'importance. Selon moi, ce qui importe, d'une part, c'est la contextualisation historique de l'expérience, laquelle permet de comprendre ce qui a motivé la réalisation de l'expérience et son apport et, d'autre, c'est un éclairage sur les phénomènes physiques en jeu : la manière dont ils sont produits et ce qu'ils signifient sur le plan de la physique.

Par ailleurs, la méthode d'élaboration et d'expérimentation de notre stratégie d'enseignement par *design experiment* (méthode itérative et collaborative) a permis aux enseignants de s'appropriier les propositions d'activités, de les rendre plus viables et reproductibles (point développé dans Bächtold & Munier, accepté). Dans les entretiens collectifs menés à la fin de chacune des deux années de cette recherche collaborative, les trois enseignants impliqués ont exprimé un grand intérêt pour les outils didactiques et les activités mises aux points ensemble. De fait, deux ans après cette recherche (en 2017-2018), le seul enseignant ayant encore des classes de Première S (Régis) continue à mettre en œuvre la séquence de Joule-Rankine. Les trois enseignants nous ont également confié que l'histoire des sciences et l'épistémologie leur ont permis de mieux comprendre le concept d'énergie et l'importance qui lui est accordée dans les programmes de physique-chimie. Je citerais ici Matthews (1994, pp. 200-201) qui soutient que « de nombreux exemples ont été apportés où l'histoire et la philosophie des sciences peuvent contribuer à un enseignement de certains sujets des programmes qui soit meilleur, plus cohérent, stimulant et critique » et ajoute que « les enseignants, en tant que professionnels, devraient avoir une connaissance historique et philosophique sur les savoirs scientifiques indépendamment du fait que cette connaissance est directement utilisée dans les classes [...]. Ils ont une responsabilité pour la

société, pour leur profession et pour leurs élèves à la fois pour comprendre la science et voir la science dans ses contextes historique, philosophique et culturel au sens large ».

Vers une formation des enseignants à l'histoire des sciences et à l'épistémologie

Plus généralement, en s'appuyant sur une revue de littérature, Höttecke et Silva (2011, pp. 293-294) pointent que l'introduction dans les classes d'éléments d'histoire des sciences et d'épistémologie permet de :

- Favoriser une compréhension plus profonde des connaissances scientifiques par les élèves (ce qui était visé dans notre recherche) ;
- Présenter les sciences comme un « processus » et, plus largement, développer chez les élèves une vision des sciences riche et critique (voir section 4.5) ;
- Stimuler l'intérêt des élèves pour les sciences ;
- Le cas échéant, présenter des exemples de femmes scientifiques jouant le rôle de modèles afin de susciter chez les filles un attrait pour des carrières scientifiques.

Höttecke et Silva (2011) soulignent cependant que peu d'enseignants introduisent effectivement l'histoire des sciences et l'épistémologie dans les classes. Ils mettent en avant plusieurs obstacles, notamment : le fait que les enseignants ne sont pas toujours convaincus de l'intérêt de faire appel à l'histoire des sciences et à l'épistémologie ; le fait qu'il ne sont pas ou mal formés pour introduire l'histoire des sciences et l'épistémologie dans leur enseignement, en particulier l'absence d'une vision des sciences qui soit riche et critique (voir section 4.5) ; la présentation de l'histoire des sciences dans les manuels scolaires (ou autres supports d'enseignement) qui est réductrice et qui peut se résumer à la mention de noms et de dates. Mentionnant également ces obstacles, de Hosson (2011, p. 13) souligne deux points supplémentaires : le nombre très limité de ressources pédagogiques pour aider les enseignants à introduire l'histoire des sciences et l'épistémologie en classe ; le fait que les textes officiels assignent un rôle secondaire à l'histoire des sciences en suggérant d'apporter des éléments historiques simplement « en complément du cours traditionnel ».

Si l'on reconnaît l'intérêt de former les enseignants à l'histoire des sciences et l'épistémologie, se pose la question de l'organisation et du contenu d'une telle formation : comment introduire des éléments d'histoire des sciences et d'épistémologie pour que ceux-ci fassent sens pour les enseignants ? À cet égard, Matthews (1994, p. 203) a proposé trois principes : « (1) l'histoire des sciences devrait servir d'introduction à la philosophie des sciences ; (2) la philosophie des sciences devrait être introduite de façon non technique ; (3) l'histoire et la philosophie devraient tous deux être reliées directement à l'enseignement des sciences ». Je proposerais de reprendre ces trois principes en modifiant et précisant le premier comme suit : l'histoire des sciences devrait servir à expliquer le contexte scientifique et socio-culturel dans lequel les nouvelles expériences ont été réalisées et les nouveaux concepts, modèles ou théories ont été élaborés, et ainsi mettre en lumière leur contribution et leur rôle dans le développement des sciences. S'agissant du troisième principe, il pourrait se traduire par la proposition d'activités pour la classe se basant sur l'histoire des sciences et l'épistémologie et un travail coopératif (entre enseignants et avec les formateurs) pour envisager leur mise œuvre dans les classes en tenant compte des pratiques et des contraintes propres à chaque enseignant.

Vers des recherches comparatives et longitudinales

S'agissant plus spécifiquement de l'enseignement de l'énergie plusieurs questions de recherche restent ouvertes. Comme je l'ai indiqué plus haut (section 3.4), plusieurs études empiriques ont mis en évidence une progression dans l'apprentissage du concept d'énergie

chez les élèves tout au long de la scolarité (Liu & McKeough, 2005, Lee & Liu, 2010, Nordine et al., 2011, Colonnese et al., 2012, Neumann et al., 2013, Lacy et al. 2014, Duit, 2014) : dans l'ordre, ils maîtrisent tendanciellement d'abord les sources et les formes d'énergie, puis les transformations et les modes de transfert d'énergie, puis, en fin de cursus, la notion de dissipation et le principe de conservation. Lors de nos échanges avec Knut Neumann, Jeffrey Nordine (IPN de Kiel) et Yaron Lehavi (Institut Weizmann de Jérusalem), une question de recherche a émergé à ce sujet : cette progression de l'apprentissage est-elle liée à la « maturation cognitive » graduelle des élèves comme le suggèrent Liu et McKeough (2005) ou est-elle dépendante d'une progression de l'enseignement qui serait alors globalement similaire dans les classes ayant fait l'objet de ces études ? À supposer que les deux éléments interviennent, quelle est la part respective de l'un et de l'autre ?

La stratégie d'enseignement décrite ci-dessus est centrée sur la notion de transformation d'énergie et la définition de Rankine, motivée par un arrière-plan historique et épistémologique. Mais d'autres entrées peuvent être privilégiées. Motivés par des considérations se situant davantage sur le plan de la physique, Fortus et ses collègues (2017) ont développé une stratégie centrée sur les notions de système, de transfert et de champ. Celle-ci fait actuellement l'objet d'expérimentations dans les classes. À supposer que la maturation cognitive et l'enseignement sont tous des facteurs de la progression des apprentissages liés à l'énergie, les questions suivantes peuvent se poser : y a-t-il une stratégie d'enseignement qui s'accorde mieux avec la maturation cognitive qu'une autre ? Si oui, est-ce le cas tout au long de la scolarité ou fonction du niveau scolaire ?

Pour répondre à ces questions sur le rôle respectif de la maturation cognitive et des différentes stratégies d'enseignement, des recherches comparatives et longitudinales semblent requises. Il conviendrait de comparer l'effet de diverses stratégies d'enseignement sur les apprentissages des élèves, et ce, tout au long de la scolarité. Néanmoins, de telles recherches apparaissent complexes à mettre en œuvre, parce qu'elles impliquent un suivi de plusieurs cohortes d'élèves sur plusieurs années (collège et lycée, voire école, collège et lycée) et un contrôle de la mise en œuvre par les enseignants (ce qui réduit leur marge de manœuvre et donc leur marge d'appropriation). Par conséquent, elles exigent de réunir une équipe de recherche conséquente et une coopération avec les Académies de l'éducation nationale pour permettre l'implication d'enseignants d'un même secteur et de plusieurs établissements sur plusieurs années. À cet égard, les perspectives de recherche restent encore ouvertes.

4. Démarches scientifiques et démarches d'investigation à l'école

Dans cette partie, je vais présenter deux recherches liées à l'enseignement des sciences par « démarches d'investigation ». La première recherche, menée de 2009 à 2013, explore les sources théoriques de cette approche de l'enseignement et vise à en clarifier les hypothèses dites « constructivistes » (sections 4.1 à 4.4). La seconde, qui est en cours et qui a été amorcée en 2014 dans le cadre du projet FORMSCIENCES, vise à mieux comprendre les liens complexes entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques de l'enseignement des sciences (sections 4.5 à 4.8).

4.1 L'enseignement par démarches d'investigation : la question des sources théoriques

Aux États-Unis, en France, en Angleterre et dans un nombre croissant de pays dans le monde, les programmes et autres textes officiels en matière d'éducation cherchent à rompre avec un enseignement des sciences consistant à faire suivre aux élèves des activités trop stéréotypées et directives, en préconisant des « investigations » plus ouvertes dans lesquelles les élèves sont davantage impliqués et qui suscitent chez eux une activité intellectuelle plus riche, faite de questionnements, d'émissions d'hypothèses, de discussion des données, etc. (Boilevin, 2013, 2017). Dans la littérature anglo-saxonne, on désigne une telle approche par l'expression « *Inquiry-Based Science Education* » (IBSE) ou « *Inquiry-Based Science Teaching* » (IBST). Le texte officiel qui pendant plusieurs années a constitué la référence en la matière est celui publié aux États-Unis en 1996 par le *National Research Council*. Ce texte décrit le principe général de l'IBSE : « l'investigation de questions authentiques générées à partir des expériences des élèves est la stratégie centrale pour enseigner les sciences » (NRC, 1996, p. 31). Comme le souligne Anderson (2007, p. 810), ce texte ne précise pas quelles sont les étapes d'un tel enseignement et quelle forme particulière doit prendre l'investigation. À cet égard, ce texte reste très ouvert. « *Inquiry-Based Science Education* » est parfois traduit en français par « enseignement des sciences basé sur la démarche d'investigation » (Rocard et al., 2007, p. 3), « Enseignement des Sciences Fondé sur l'Investigation » (ESFI, Boilevin, 2013) ou plus brièvement par « démarche d'investigation » (DI) (ex : MEN, 2008, 2015). Toutefois, l'IBSE ne peut pas être identifié strictement avec la DI. Cette dernière désigne l'approche préconisée dans les textes officiels français, depuis l'an 2000, pour l'enseignement des sciences de l'école primaire au lycée, suivant les recommandations du « Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école » de 2000 (MEN, 2000). La DI telle qu'elle est formalisée dans ces textes officiels fait référence explicitement à l'opération de « la main à la pâte » lancée en 1996 (Charpak, 1996), elle-même inspirée de l'expérience américaine *Hands On* à Chicago (*ibid.*, pp. 8-10). La DI est composée d'un ensemble d'étapes qui ont été décrites de façon très précise dans les programmes de l'école primaire en 2002 (MEN, 2002) et dans ceux du collège en 2005 et 2008 (MEN, 2005, 2008). Par exemple, le « canevas » proposé par les programmes du collège en 2008 (MEN, 2008, p. 4) est composé des 7 « moments » suivants : « (1) le choix d'une situation – problème ; (2) l'appropriation du problème par les élèves ; (3) la formulation [...] d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles ; (4) l'investigation [...] conduite par les élèves ; (5) l'échange argumenté autour des propositions élaborées ; (6) l'acquisition et la structuration des connaissances ; (7) la mobilisation des connaissances » (à noter que ces étapes ne sont pas supposées être toutes réalisées pour chaque démarche d'investigation mises en œuvre, ni être réalisée de manière linéaire sans des allers-retours entre étapes). Bien que cela ne soit pas explicite, certaines des notions utilisées dans les textes officiels (par exemple, celles de situation-problème ou de structuration des

connaissances) proviennent des travaux de didacticiens des sciences, comme ceux menés à l'INRP dans les années 1970 et 1980. La DI devrait donc être considérée plutôt comme une déclinaison particulière de l'IBSE ou du modèle « investigation-structuration » développé par l'INRP (Host & Martinand, 1975, Martinand et al., 1980, Astolfi et Develay, 1989 ; sur les liens entre ce modèle et l'IBSE, voir Calmettes & Boilevin, 2014). Dans ce qui suit, il ne sera pas question de la DI en particulier, ni des similarités et différences de celle-ci avec les autres déclinaisons de l'IBSE dans les programmes d'autres pays (Coquidé et al., 2009, Dell'Angelo, Coquidé & Magneron, 2012), mais de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation *au sens générique*, que je désignerai dorénavant par le sigle IBSE.

Pourquoi les enseignants devraient-ils faire mener aux élèves des investigations plutôt que d'exposer directement les connaissances établies par les scientifiques ? Plusieurs raisons ont été mises en avant dans les textes officiels (NRC, 1996, La main à la pâte *et al.*, 2002, MEN, 2002, 2008, 2010a, 2010b, 2015, Rocard *et al.*, 2007, OCDE, 2011). Premièrement, un enseignement des sciences par démarches d'investigation fait participer les élèves à la « construction » des connaissances, ce qui est supposé favoriser leur apprentissage de ces connaissances. Deuxièmement, faire pratiquer aux élèves des démarches inspirées de celles des scientifiques est supposé développer leur manière de raisonner et leurs compétences méthodologiques, mais aussi enrichir leur vision des sciences. Troisièmement, il donne aux élèves une large part d'initiative, ce qui peut être source de motivation et leur donner le goût pour les sciences. Si les finalités de l'IBSE ne sont pas formulées de façon identique selon les textes officiels, l'objectif général commun est de développer chez les élèves une « culture scientifique » (ou « *scientific literacy* ») leur permettant de s'engager de façon éclairée dans les questions de société qui mettent en jeu les sciences (Boilevin, 2013, 2017).

Je reviendrai plus loin sur la deuxième raison relative à la vision des sciences. Attardons-nous ici sur la première raison relative à la construction et l'apprentissage des connaissances. L'IBSE repose sur l'hypothèse selon laquelle les élèves apprennent et comprennent les connaissances scientifiques s'ils sont actifs physiquement (avec leurs mains, d'où l'expression anglaise « *hands on* », signifiant littéralement « les mains dessus » et que Charpark et al., 1996, ont traduit par « la main à la pâte ») et intellectuellement (*minds on*), ce que le *National Research Council* (NRC, 1996, p. 20) résume par le slogan : « apprendre la science est quelque chose que les élèves font, pas quelque chose qui leur est fait ». L'activité manipulative menée par les élèves à l'occasion d'une investigation leur permet de confronter les connaissances scientifiques au « réel » (MEN, 2008, p. 4). Cette investigation engage également les élèves dans une activité intellectuelle très riche : questionnements face à des phénomènes pouvant apparaître problématique, émission d'hypothèses, planification d'investigations, interprétation et discussion des résultats des investigations, etc. Le cheminement intellectuel suivi par les élèves est supposé leur permettre de « construire » eux-mêmes les connaissances scientifiques. Le *National Research Council* (NRC, 1996, p. 29) écrit ainsi : « les élèves devraient être initiés à la science d'une manière qui les engage dans la construction active d'idées et d'explications » (NRC, 1996, p. 121). Dans le même esprit, les anciens programmes français du collège de 2005 et 2008 (MEN, 2005, p. 6, 2008, p. 4) parlent d'une « démarche qui privilégie la construction du savoir par l'élève ». À noter que l'idée de la « construction » des connaissances scientifiques par les élèves est beaucoup moins présente dans les programmes actuels du primaire et du collège (MEN, 2015).

Parce qu'il est supposé rendre possible la « construction » des connaissances scientifiques par les élèves, l'IBSE est communément qualifié de « constructiviste ». Le constructivisme est aujourd'hui considéré comme l'une des principales approches en didactique des sciences, voire l'approche dominante (Matthews, 1997, p. 5). Cependant, que recouvre exactement le terme « constructivisme » ? De quel constructivisme parle-t-on en didactique des sciences, et en particulier, s'agissant de l'IBSE ? La réponse n'est pas simple étant donnée l'existence de « multiples formes de constructivismes » (Good, 1993, p. 1015). Différentes classifications de ces formes de constructivismes ont été avancées (Gale, 1995, Nola, 1997, Matthews, 2000). M'inspirant de celles-ci, j'ai proposé la classification suivante (Bächtold, 2013d), laquelle est sans doute quelque peu réductrice, mais vise à fixer provisoirement les idées pour les développements qui suivent :

- Le *courant constructiviste en psychologie du développement cognitif*, selon lequel le sujet cognitif construit des connaissances afin de décrire et prédire ses expériences personnelles lors de ses interactions avec son environnement à la fois physique et social ;
- Le *courant constructiviste en épistémologie*, selon lequel les scientifiques construisent les connaissances afin de décrire et prédire l'ensemble des phénomènes survenant ou pouvant survenir lors de notre interaction avec le monde ;
- Et le *courant constructiviste en didactique des sciences*, selon lequel l'enseignant propose aux élèves des tâches donnant lieu à des activités qui, idéalement, leur permettent de construire les connaissances enseignées.

L'IBSE a été développé par les représentants du courant constructiviste dans le domaine de la didactique des sciences. Pour autant, la conception de cette approche de l'enseignement des sciences n'est pas sans lien avec les domaines de la psychologie du développement cognitif et de l'épistémologie. On peut même dire qu'elle puise ses fondements théoriques dans ces domaines, comme en témoignent les références récurrentes des didacticiens des sciences qui développent ou préconisent l'IBSE à des auteurs tels que Piaget, Vygotski ou Bruner, pour ce qui est du domaine de la psychologie du développement cognitif, et Dewey, Bachelard ou Kuhn, pour ce qui est de l'épistémologie. D'ailleurs, comme le soulignent Calmettes et Boilevin (2014) en citant Martinand, c'est de façon plus générale le domaine de la didactique des sciences qui s'est constitué « à partir de considérations épistémologiques [...] et psychologiques ».

Venant du domaine de l'épistémologie, il m'est apparu intéressant d'explorer plus précisément l'influence qu'a exercée ce domaine sur l'IBSE et plus largement sur le constructivisme en didactique des sciences. Ainsi, entre 2009 et 2013, en parallèle à mes recherches sur l'enseignement de l'énergie, j'ai mené une étude approfondie de la littérature pour tenter d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : Quelles sont les influences respectives de la psychologie du développement cognitif et de l'épistémologie sur les hypothèses qui sous-tendent l'IBSE ou plus largement le constructivisme ? Comment ces deux sources théoriques, qui de prime abord apparaissent très hétéroclites, s'articulent-elles ? En explorant ces deux questions, j'ai été confronté à des usages variés du terme « construire », de sorte qu'une autre question a émergé : Qu'est-ce que les élèves sont supposés « construire » suivant le constructivisme en didactique des sciences ? L'étude de ces questions a donné lieu à la publication de deux articles dans les revues *Tréma* (Bächtold, 2012a) et *Research in Science Education* (Bächtold, 2013e). Le premier article fait partie d'un dossier thématique intitulé « Épistémologie et didactique de

la physique : le constructivisme en question », correspondant à un numéro spécial de la revue *Tréma* que j'ai coordonné (Bächtold, 2012b). Ce dossier a rassemblé des articles de plusieurs spécialistes du constructivisme tels que Michael Matthews, Daniel Gil-Pérez ou Alberto Martínez Delgado. Je vais présenter dans ce qui suit les principales idées développées dans ces deux articles, en les réorganisant et en cherchant à mettre en évidence les apports de cette étude.

4.2 La prise en compte des conceptions initiales

Constructivisme et IBSE

Un premier point qui ressort de cette étude est que la prise en compte des conceptions initiales des élèves dans le constructivisme en didactique des sciences et en particulier dans l'IBSE constitue une contribution majeure de la psychologie du développement cognitif. Avant de préciser ce point, il convient de préciser le statut du constructivisme en didactique des sciences et les liens qu'il entretient avec l'IBSE. La question du statut peut être formulée ainsi : le constructivisme correspond-t-il à une théorie de l'apprentissage ou de l'enseignement des sciences ? La question des liens avec l'IBSE peut quant à elle s'exprimer ainsi : constructivisme et IBSE constituent-ils une seule et même approche ?

Plusieurs auteurs conçoivent le constructivisme en didactique des sciences comme une théorie de l'apprentissage (Fosnot & Perry, 2005, p. 33, Loyens & Gijbels, 2008, p. 352, Baviskar et al., 2009, p. 542). Les variantes de cette théorie, d'après Jenkins (2000, p. 601) ont une « base commune » : apprendre de nouvelles connaissances implique l'engagement actif de l'élève, dans la mesure où celui-ci doit construire ces connaissances. Selon lui et d'autres auteurs, cette théorie de l'apprentissage ne nous dit pas exactement comment il convient d'enseigner, ce qu'ils considèrent comme une faiblesse (Millar, 1989, p. 589, Jenkins, 2000, p. 603, Kotzee, 2010, p. 177). Autrement dit, le constructivisme n'implique pas une approche particulière de l'enseignement, en particulier, il ne conduit pas nécessairement à l'IBSE. Si l'IBSE est bien une approche de l'enseignement des sciences qui favorise la construction des connaissances par l'élève, celle-ci n'est nullement la seule (Osborne, 1996, p. 76, Jenkins, 2000, p. 603, Baviskar, Hartle & Whitney, 2009, p. 544). La construction des connaissances implique une activité intellectuelle (ou « cognitive ») mais non nécessairement une activité manipulatoire (ou « corporelle »), les deux types d'activité devant être clairement distingués (Mayer, 2009, p. 184). Il est en effet possible d'envisager d'autres moyens pour stimuler l'activité intellectuelle.

Cependant, le constructivisme peut aussi être vu comme une théorie de l'enseignement dans la mesure où il conduit à la formulation de propositions précises pour l'enseignement des sciences : en particulier, faire émerger les conceptions initiales des élèves sur le sujet enseigné et provoquer un conflit cognitif chez les élèves qui met en confrontation leurs conceptions initiales avec de nouveaux phénomènes, les conceptions d'autres élèves ou de nouvelles connaissances (Baviskar et al., 2009, pp. 543-544). L'attention portée aux conceptions initiales des élèves est reconnue de façon consensuelle comme la contribution du constructivisme à la didactique des sciences (Solomon, 1994, p. 6, Osborne, 1996, p. 63). Les élèves ont des conceptions initiales qui constituent des « alternatives » aux conceptions scientifiques (Driver & Easley, 1978, p. 62) et qui tendent à persister ou coexister avec les nouvelles connaissances (Driver et al., 1985, p. 199, Duit, 1995, p. 278, Tyson et al., 1997, pp. 391-392). Suivant le constructivisme, les enseignants doivent prendre en compte ces conceptions initiales, chercher à les « changer » (Posner et al., 1982) et/ou à surmonter les

« difficultés » ou « obstacles » qui leurs sont associés (Driver & Easley, 1978, p. 80, Martinand, 1986, p. 290, Viennot, 1996, p. 12).

Les travaux de Piaget

Or, la source d'influence principale du constructivisme en didactique des sciences concernant l'importance de la prise en compte des conceptions initiales correspond au constructivisme en psychologie du développement cognitif et plus précisément au constructivisme de Piaget. Les références des didacticiens des sciences à Piaget sont nombreuses. Afin de clarifier la manière dont s'est exercée l'influence de Piaget, je me suis penché sur ses écrits, avant d'examiner quels sont les travaux qui ont été effectivement exploités par les didacticiens des sciences.

S'agissant d'abord de ses travaux, des distinctions peuvent être opérées. D'une part, Piaget a mené de très nombreuses *études empiriques* mettant en lumière les capacités sensorielles, motrices et intellectuelles, ainsi que les conceptions des enfants aux différents âges, de la naissance à l'adolescence, en identifiant des « stades ». D'autre part, il a développé une *théorie du développement cognitif* orientant ces études empiriques et visant à en expliquer les résultats.

Au niveau de cette théorie elle-même, trois éléments peuvent être repérés. Premièrement, Piaget a décrit le *mécanisme général du développement cognitif de l'enfant* en termes de « déséquilibre » et d'« accommodation » (Piaget, 1977a [1936], 1977b [1937], Piaget & Inhelder, 1966). Plus précisément, selon lui, l'enfant « construit » spontanément et inconsciemment des « structures cognitives » pour mettre en ordre ses expériences et anticiper les effets des actions qu'il mène dans son environnement physique et social. Si elles le peuvent, les nouvelles expériences sont « assimilées » par les structures cognitives de l'enfant, c'est-à-dire intégrées à elles en les faisant évoluer de façon graduelle. Lorsque de nouvelles expériences ne peuvent pas rentrer dans le moule de ces structures, ces dernières provoquent un « déséquilibre » ; elles perturbent l'enfant sur le plan cognitif. Toujours spontanément et inconsciemment, l'enfant va alors progressivement remplacer certaines parties de ces structures cognitives et les réorganiser – ce processus d'adaptation ne s'opérant pas subitement mais sur le long terme. Piaget désigne ce processus d'adaptation par les termes « accommodation » ou « équilibration ».

Un second élément de sa théorie du développement cognitif est la *description précise des structures cognitives sous-jacentes*, de leur nature et de la façon dont l'enfant les construit. D'après Piaget, les concepts ou « schèmes » de l'objet permanent, de l'espace, du temps, etc., sont construits sur la base de « structures logico-mathématiques ». Ces dernières sont elles-mêmes construites à partir des actions menées par l'enfant et intériorisées par lui sous formes d'« opérations » mentales. Plus précisément, ces opérations sont reliées par l'enfant par des propriétés d'associativité, de réversibilité, d'identité, etc., de manière à former une structure de groupe au sens mathématique. Un objet, une longueur ou une masse sont, selon Piaget, la réification des invariants de tels groupes (1973 [1949], chap. V).

Enfin, un troisième élément de cette théorie du développement cognitif réside dans les liens étroits qu'elle entretient avec l'épistémologie. Laissant de côté la question épistémologique de la nature de la connaissance en général (ce qu'elle est et comment elle est possible), Piaget entend apporter des éléments de réponse à la question épistémologique de la genèse concrète des connaissances scientifiques (comment elles se constituent et évoluent). Ces éléments de réponse, il estime pouvoir les trouver dans ses études empiriques sur le développement cognitif de l'enfant (1970, pp. 14, 34 et 38).

Réciproquement, l'épistémologie dite « génétique » influence sa théorie du développement cognitif, et ce, de deux manières. D'abord, Piaget défend une conception évolutionniste de la connaissance scientifique selon laquelle celle-ci résulte d'un processus d'« adaptation de la pensée à la réalité » (1970, p. 35). C'est dans ce cadre de pensée épistémologique qu'il conçoit le mécanisme général du développement cognitif de l'enfant en termes de déséquilibre et d'accommodation. Ensuite, parce que le ressort du développement cognitif de l'enfant est le même que celui du développement des connaissances scientifiques dans l'histoire de l'humanité, à savoir l'adaptation à l'environnement physique, il existe entre les deux un « parallélisme ». Ainsi, l'histoire des sciences pourrait fournir des informations indicatives sur le développement cognitif possible d'un enfant à propos de certains concepts scientifiques (1973 [1949], pp. 13 et 104-105 et Piaget & Garcia, 1983, pp. 39 et 131).

Il est à noter que pour Piaget, l'école joue un rôle secondaire dans le développement cognitif de l'enfant : « l'école peut ignorer ou favoriser [ce développement] selon les méthodes employées » (1969, pp. 61-62). En dernière instance, c'est l'enfant lui-même qui construit ses structures cognitives et les révisé pour les adapter à ses expériences nouvelles.

Les études empiriques sur les conceptions des enfants

De quelle manière ces différents aspects des travaux de Piaget ont nourri le constructivisme en didactique des sciences et, en particulier, contribué à la prise en compte des conceptions initiales des élèves ? En premier lieu, ce sont ses études empiriques sur les conceptions des enfants qui, dans les années 1970 et 1980, ont fortement influencé les recherches en didactique des sciences, domaine alors en phase d'émergence (Driver & Easley, 1978). Elles ont permis de mettre en évidence l'existence de ces conceptions qui sont « construites » par les enfants, le fait qu'elles sont généralement opératoires pour les expériences vécues par l'enfant et le fait qu'elles évoluent avec l'âge. Elles ont également fourni des premiers résultats sur un ensemble de conceptions particulières (sur l'espace, le temps, la conservation de la quantité de matière, la force...), constituant un point de départ pour les études ultérieures menées par les didacticiens des sciences. Nombre d'entre eux, cependant, n'ont pas adopté les explications théoriques des résultats avancées par Piaget, en l'occurrence ni sa description du mécanisme général du développement cognitif de l'enfant, ni sa description précise des structures cognitives sous-jacentes (Driver & Easley, 1978, pp. 64 et 79).

Le fait que certains didacticiens des sciences aient poursuivi les recherches de Piaget sur les conceptions sans reprendre son approche théorique peut s'expliquer par un changement d'orientation : alors que Piaget s'appuyait sur les conceptions explicites des élèves comme un moyen d'accès aux structures cognitives dans le contexte d'expériences de la vie quotidienne, les didacticiens des sciences considèrent ces conceptions comme ce à quoi les connaissances scientifiques enseignées sont confrontées dans le contexte de la classe. En raison de ce changement de problématique, non seulement le cadre théorique de Piaget, mais aussi la terminologie associée étaient à adapter (Solomon, 1994, p. 3).

La connaissance des conceptions récurrentes des élèves, qu'il s'agisse d'aspects généraux des conceptions (tels que la tendance à la substantialisation ou au raisonnement causal séquentiel) ou de conceptions particulières dans les différents domaines des sciences (mécanique, électricité, états de la matière...) apparaît essentielle en didactique des sciences (Driver et al., 1985, et Driver, Squires et al., 1994, Viennot, 1996, Duit, 2009). D'une part, ces conceptions sont à prendre en compte pour la transposition didactique des connaissances scientifiques, c'est-à-dire dans le travail de réorganisation et de reformulation de ces

connaissances, dont le but est que ces dernières puissent être comprises et intégrées par les élèves. D'autre part, la reconnaissance même de l'existence des conceptions initiales des élèves qui arrivent en classe peut conduire à revoir la stratégie d'enseignement des sciences. En particulier, cet enseignement peut prendre ces conceptions comme point de départ. C'est ce qui est proposé dans l'IBSE.

À noter que les conceptions des élèves sont inférées par les didacticiens des sciences à partir de l'analyse de productions écrites ou d'expressions orales des élèves dans des situations spécifiques (durant des activités en classe, au cours d'entretiens, dans des questionnaires...). Ainsi, comme le souligne Santini (2009), ces conceptions attribuées aux élèves peuvent être considérées, dans une certaine mesure, comme une « construction du chercheur » et comme dépendantes de la situation considérée.

La théorie du changement conceptuel

La théorie de Piaget n'a pas été délaissée en bloc par tous les didacticiens des sciences. Certes, la *description précise des structures cognitives sous-jacentes* au développement cognitif n'a semble-t-il trouvé chez eux qu'un faible écho (à l'exception de von Glasersfeld, 1995, 2005, qui a développé le « constructivisme radical », lequel a fait l'objet de nombreuses critiques, notamment par Osborne, 1996, Nola, 1997 et Martinez-Delgado, 2002). Mais, il n'en va pas de même du *mécanisme général du développement cognitif* en termes de déséquilibre et d'accommodation. Celui-ci se retrouve au cœur de la « théorie du changement conceptuel » proposée par Posner et ses collègues en 1982 (Posner *et al.*, 1982), laquelle a été discutée et développée par de nombreux autres auteurs. Cette théorie vise à décrire le « processus » par lequel un élève abandonne une conception erronée pour adopter une conception scientifiquement acceptée. La description proposée n'a pas pour objet les structures cognitives sous-jacentes aux conceptions, comme chez Piaget, mais se situe uniquement au niveau des concepts explicites associés aux conceptions. La source d'influence principale de cette théorie est l'épistémologie de Kuhn. Néanmoins, elle reprend à Piaget l'idée d'« accommodation » (Posner *et al.*, 1982, p. 212). En note de bas de page (*ibid.*, note 4), Posner et ses collègues affirment qu'ils ne reprennent pas à Piaget « ses théories ». On peut interpréter cette note comme une prise de distance vis-à-vis de la théorie piagétienne des structures logico-mathématiques. Cependant, de fait, ces auteurs empruntent à la théorie piagétienne l'idée du mécanisme général du développement cognitif, suivant laquelle c'est l'inadéquation du système conceptuel existant qui motive sa révision. Plus précisément, la théorie du changement conceptuel peut se voir selon moi comme une *extension* au cadre scolaire de la théorie piagétienne, cette dernière concernant essentiellement les expériences quotidiennes extrascolaires de l'enfant.

Toutefois, lors de cette extension, on peut identifier au moins deux aspects nouveaux qui apparaissent avec la théorie du changement conceptuel. Premièrement, dans la vie quotidienne extrascolaire (selon la théorie de Piaget), le processus cognitif de changement conceptuel est mené de manière spontanée et inconsciente par l'enfant. Il n'en va pas de même dans le cadre scolaire (selon la théorie de Posner *et al.*), où le processus cognitif de changement conceptuel est mené volontairement et consciemment par l'élève. Deuxièmement, dans la vie quotidienne extrascolaire (selon la théorie de Piaget), les conceptions nouvelles que les enfants substituent à leurs conceptions inadéquates sont construites par les enfants eux-mêmes. Tel n'est pas le cas en classe (selon la théorie du changement conceptuel), où les conceptions scientifiques que les élèves substituent à leurs conceptions initiales au terme d'un travail de réorganisation conceptuelle sont introduites par l'enseignant.

En faisant parfois référence à Posner et ses collègues, de nombreux didacticiens des sciences ont diffusé l'idée piagétienne de « déséquilibre » (expression de Piaget) ou « conflit cognitif » (expression plus courante en didactique des sciences). Un tel conflit survient lorsqu'un phénomène observé ou rapporté à un élève apparaît inexplicable au regard des conceptions qu'il possède, ou comme nous l'avons exprimé plus haut, lorsque ses conceptions se révèlent inadéquates pour rendre compte de ce phénomène. Reconnu comme ce qui motive le changement de conception, le conflit cognitif a été placé par ces didacticiens au point de départ de l'activité d'enseignement, comme dans le cas de l'IBSE. Dans cette perspective, les conceptions des élèves ne sont pas simplement à connaître en amont de l'enseignement en classe comme une donnée à prendre en compte pour la transposition didactique des connaissances scientifiques. Ces conceptions sont mises en jeu dans le conflit cognitif. Or, d'après ces didacticiens des sciences, pour qu'elles puissent être mises en jeu, elles doivent devenir explicites, c'est-à-dire que les élèves doivent les exprimer d'une manière ou d'une autre (oralement, par un schéma...). Faire émerger (« *to elicit* » dans la littérature anglo-saxonne) les conceptions des élèves afin de provoquer le conflit cognitif est un procédé préconisé par la majorité des théories de l'enseignement des sciences constructivistes (Baviskar et al., 2009).

Le parallèle avec l'histoire des sciences

Un certain nombre d'études de didacticiens des sciences sur les conceptions des élèves pointe des similarités avec l'histoire des sciences. Par exemple, dans un article très souvent cité, Viennot (1979, p. 213) établit un parallèle entre, d'un côté, la conception récurrente (chez les élèves dans le secondaire et à l'université) suivant laquelle la force se situerait dans les objets eux-mêmes, et de l'autre, la théorie de l'*impetus* (théorie de la dynamique au Moyen Âge, intermédiaire entre celle d'Aristote et celle de Newton). Un autre exemple de parallélisme souvent évoqué est celui concernant la chaleur, laquelle est conçue chez les élèves d'abord comme une substance, comme ce fût le cas chez certains scientifiques dans la première partie du XIXe siècle (Driver, Squires et al., 1994, p. 138).

Concernant ce procédé de mise en parallèle entre les conceptions des élèves et l'histoire des sciences, certains didacticiens des sciences se sont inspirés des travaux de Piaget (Martinand et al., 1980, pp. 73-74). À cet égard, le domaine de provenance de la source d'influence piagétienne est autant l'épistémologie que la psychologie du développement cognitif, puisqu'il est question ici d'un rapprochement entre ces deux domaines.

Cette influence doit néanmoins être nuancée. Chez Piaget, cette mise en parallèle s'adosse à une hypothèse forte, celle de l'« unité des lois d'adaptation intellectuelle à l'objet » (1973 [1949], p. 105) : l'évolution des structures de pensée serait identique à l'échelle d'un enfant ou à l'échelle de l'histoire des sciences. Cette hypothèse ontogénéologique a été remise en cause par des didacticiens des sciences. Par exemple, Giannetto (1993, p. 228) estime que les processus de développement cognitif au niveau d'un individu et ceux au niveau de l'histoire des sciences sont « incommensurables ». C'est également ce que soutient Gauld (1991, p. 135) qui souligne que dans le premier cas, ces processus sont inconscients, alors qu'ils sont conscients, rationnels et contrôlés dans le second cas. Driver, Guesne et Tiberghien (1985, p. 198) font également remarquer que les points communs entre les conceptions des élèves et celles des scientifiques dans l'histoire sont limités et que les premières sont généralement bien moins cohérentes que les secondes.

Le conflit sociocognitif

Au sein de l'« école de Genève », les travaux de Piaget ont été prolongés sur les aspects sociaux du développement cognitif, notamment par Doise, Mugny et Perret-Clermont. Ces auteurs ont repris à leur compte la description de Piaget en termes de structures logico-mathématiques ainsi que son hypothèse d'après laquelle ces structures qui sous-tendent les processus cognitifs au niveau d'un individu sont identiques à celles qui sous-tendent les interactions sociales impliquant des échanges d'idées (Doise, Mugny & Perret-Clermont 1975, pp. 367-368). Leurs études empiriques guidées par ce cadre théorique piagétien les ont conduits à proposer une notion originale, celle de « conflit sociocognitif ». Un tel conflit survient entre les conceptions contradictoires de deux enfants (ou plus) rendues manifestes lors de leurs interactions communicationnelles (Doise & Mugny, 1981, p. 40).

Cette notion de conflit sociocognitif a inspiré les didacticiens des sciences dans la mouvance constructiviste et se voit mise en œuvre, en particulier, dans l'IBSE : la phase de discussion collective conduisant à l'identification du problème à investiguer ou la phase de travail en petits groupes visant à déterminer les hypothèses à explorer sont considérées comme des occasions pour les élèves de faire l'épreuve de conflits sociocognitifs.

Le conflit sociocognitif présente un intérêt, non seulement parce qu'il peut être le moteur d'un changement de conception (à l'instar d'un conflit cognitif personnel), mais également parce qu'il peut conduire à une coopération entre les élèves. Ces derniers peuvent chercher à dépasser ensemble leurs oppositions, en coordonnant leurs actions et leurs idées, ce qui peut se révéler plus fructueux pour la construction de nouvelles connaissances qu'une investigation menée individuellement. Doise & Mugny (1981, p. 46) décrivent ainsi « la coopération comme un processus social de construction ». Cette coopération est favorisée dans l'IBSE lors de la phase de l'investigation proprement dite laquelle est généralement menée en petits groupes.

Les chercheurs en psychologie du développement cognitif ont cependant remarqué que les conflits sociocognitifs n'ont pas toujours des effets bénéfiques (Doise & Mugny, 1981, pp. 176-178, Houdé & Winnykammen, 1992, pp. 94-97, Blaye & Lemaire, 2007, pp. 288-289). Plusieurs conditions sont nécessaires : en particulier, les élèves doivent avoir des compétences suffisantes pour intégrer les apports des interactions avec les autres ; une alternance entre des moments de travail interactif et des moments de travail individuel est nécessaire ; ou encore, une réciprocité et des affinités entre les enfants sont requises. Autrement, la régulation du conflit risque de s'opérer, non pas sur le plan cognitif, mais sur le plan relationnel. Par exemple, il peut arriver qu'un élève cède à l'autre et se soumette simplement à son point de vue.

L'acculturation scientifique

L'approche de Perret-Clermont, Doise et Mugny qui s'inscrit dans la ligne de Piaget est souvent désignée par l'expression « socio-constructivisme ». Or, cette expression est également employée pour faire référence à l'approche de l'enseignement des sciences inspirées des travaux de Vygotski. Il convient pourtant de bien distinguer ces deux types d'approches. Pour le dire de façon schématique, le socio-constructivisme de Perret-Clermont, Doise et Mugny porte davantage sur les interactions sociales entre élèves, tandis que le socio-constructivisme dans la ligne de Vygotski porte davantage sur les interactions sociales entre les élèves et l'enseignant.

Une distinction essentielle qui a été proposée par Vygotski (1997 [1934]) est celle entre les « concepts spontanés », ceux que l'enfant construit spontanément et de manière inconsciente à partir de ses propres expériences (ex : espace, temps, causalité...), et les

« concepts scientifiques », ceux qui sont des « produits historico-culturels » et que les adultes transmettent aux enfants (ex : force, énergie, intensité du courant électrique...). Ces concepts scientifiques ont été forgés collectivement et souvent sur une longue période de l'histoire humaine, de sorte qu'il paraît inenvisageable qu'un enfant puisse les construire de lui-même isolément et sur une courte période.

De quelle manière les enfants s'approprient-ils ces concepts ? Vygotski (1997 [1934]) a apporté plusieurs éléments de réponse à cette question en s'appuyant sur des études empiriques. D'après lui, les concepts scientifiques sont transmis par les enseignants sous forme de définitions explicites et générales. Par conséquent, les enfants ne les mettent en relation avec des expériences concrètes que progressivement, suivant un mouvement du général au particulier, inverse de celui de la construction des concepts spontanés. Autrement dit, ces concepts prennent sens pour les élèves à travers une imprégnation empirique graduelle (idée que nous avons reprise dans notre recherche sur l'enseignement de l'énergie, voir section 3.6). Par ailleurs, les enfants sont amenés à travailler avec les concepts scientifiques de manière consciente et volontaire, contrairement aux concepts spontanés dont la manipulation reste inconsciente. Cette activité intellectuelle nouvelle nécessite l'aide des enseignants. Vygotski souligne en outre que l'appropriation des concepts scientifiques se fait par l'intermédiaire des concepts spontanés, de façon analogue à l'apprentissage d'une langue étrangère par l'intermédiaire de la langue maternelle. Enfin, lors de l'appropriation des concepts scientifiques, c'est tout l'ensemble du système conceptuel, comprenant les concepts spontanés, qui est réorganisé.

En didactique des sciences, les travaux de Vygotski ont inspiré plusieurs auteurs. En particulier, dans un article influent, Driver, Asoko et leurs collègues (1994, p. 7) critiquent l'approche constructiviste centrée sur les processus de conflit cognitif et de changement conceptuel opérés par une enfant qui interagit avec les objets matériels de son environnement : « ce qui n'est pas considéré de façon substantielle ce sont les interactions des apprenants avec des réalités *symboliques*, les outils culturels de la science ». Ces auteurs mettent l'accent sur la nature discursive de la connaissance scientifique, laquelle est socialement construite et validée. Pour cette raison, ils conçoivent l'apprentissage des sciences comme un « processus d'acculturation » : « [...] apprendre est décrit comme le processus par lequel des individus sont introduits dans une culture par des membres plus compétents. Lorsque cela arrive, ils « s'approprient » les outils culturels à travers leur engagement dans les activités de cette culture » (*ibid.*, p. 8). Dans cette perspective, l'enseignant joue le rôle d'un médiateur, celui qui rend les connaissances et pratiques scientifiques accessibles aux élèves.

4.3 Contributions effectives et possibles de l'épistémologie

Le parallèle entre démarches d'investigation et démarches des scientifiques

Comme nous venons de le voir, pour décrire les processus d'apprentissage à l'œuvre dans le cadre de l'IBSE, les didacticiens des sciences portent une grande attention aux conceptions des élèves et, à cet égard, font souvent référence à la psychologie du développement cognitif. En revanche, pour décrire les types d'activités que les enseignants font mener aux élèves en classe dans le cadre toujours de l'IBSE, ils font souvent un parallèle entre, d'un côté, ces activités (appelées « *inquiries* » ou « *scientific inquiries* » dans la littérature anglo-saxonne et « investigations », « démarches d'investigation » ou « démarches scientifiques » dans la littérature francophone) et, de l'autre, les activités ou démarches menées par les scientifiques dans leurs laboratoires. À cet égard, ils font alors

parfois référence à des travaux d'épistémologues. Les démarches d'investigation que les élèves sont invités à mener en classe correspondent à une forme de transposition didactique (Chevallard, 1991) des démarches scientifiques, lesquelles constituent des « pratiques sociales de référence » au sens de Martinand (1986). Cette transposition n'a pas pour objet de départ des savoirs savants décontextualisés, mais plus largement les pratiques des scientifiques pour développer ces savoirs, voire aussi leurs normes, valeurs et attitudes Boilevin et al. (2016).

Comment opérer une telle transposition didactique ? Cette question n'est pas évidente étant donné que les enjeux éducatifs associés à l'IBSE sont multiples. En particulier, il ne s'agit pas simplement de faire apprendre aux élèves des connaissances scientifiques, mais aussi de développer leurs compétences méthodologiques et leur vision des sciences. Ces enjeux ne sont pas nécessairement compatibles et pourraient entrer en tension : les démarches d'investigation qui assurent un meilleur apprentissage des connaissances scientifiques ne sont peut-être pas les démarches d'investigation qui développent la vision la plus riche et la plus critique du fonctionnement des sciences. Je reviendrai sur la question de la vision des sciences plus loin (section 4.5).

Par ailleurs, remarquons que dans le domaine de l'épistémologie, plusieurs conceptions des démarches scientifiques, ou plus largement des sciences, se sont opposées. L'idée de transposition didactique élargie soulève ainsi une seconde question : Quelle conception des démarches scientifiques convient-il de prendre comme référence pour opérer cette transposition ? À cet égard, l'histoire de l'enseignement des sciences est instructive : il apparaît que l'évolution de l'approche pour l'enseignement des sciences préconisée dans les textes officiels en France au cours du XXe siècle peut être mise en parallèle avec une évolution concomitante dans le domaine de l'épistémologie (Kahn, 2000). Plus précisément, en explorant les sources théoriques du constructivisme et en particulier de l'IBSE, j'ai pu montrer que, parmi les différents points qui marquent cette évolution dans le domaine de l'épistémologie, plusieurs ont été pris en compte de façon explicite dans l'IBSE, un point important se retrouve dans l'IBSE mais n'a été que peu discuté (la charge théorique des données) et, enfin, un point n'a pas encore été pris en compte alors qu'il pourrait alimenter la réflexion pour la mise en œuvre de l'IBSE (la sous-détermination de la théorie par l'expérience).

Dans ce qui suit, je vais présenter ces points d'épistémologie en lien avec l'IBSE, en synthétisant certaines idées tirées de l'article mentionné plus haut (Bächtold, 2012a) et en développant d'autres (en particulier, en mettant en avant la référence au tournant pratique en philosophie des sciences).

Le guidage des observations et des expériences par la théorie

La conception des sciences remise en cause par les didacticiens des sciences constructivistes et préconisant l'IBSE est celle de l'inductivisme associé au courant positiviste du XIXe siècle (l'inductivisme ayant été développé sous une forme nouvelle dans la première partie du XXe dans le courant du positivisme logique). Pour le dire de façon schématique, selon cette conception, les données d'observations et d'expériences sont premières et vierges de toute théorie, tandis que les théories viennent en second et sont « induites » de ces données, c'est-à-dire qu'elles résultent d'un raisonnement qui généralise les informations apportées par les données. Cette conception est sous-jacente à la « leçon de choses », l'approche de l'enseignement des sciences préconisée depuis la fin du XIXe siècle jusque dans les années 1970 et le tournant de « l'éveil scientifique » (Kahn, 2000). Suivant

cette approche, il suffirait que les élèves observent les « choses » ou expérimentent sur elles pour en tirer les connaissances visées par l'enseignement.

Au cours du XXe siècle, cette forme d'inductivisme a été vivement critiquée par les épistémologues. Au moins trois objections lui ont été adressées qui font aujourd'hui consensus dans le domaine de l'épistémologie. La première objection est la remise en cause de l'idée selon laquelle l'expérience précède la théorie. Nombre d'observations et d'expériences sont en effet motivées et guidées par un questionnement qui s'appuie sur des connaissances scientifiques préalables et qui peut conduire à l'émission d'hypothèses (c'est-à-dire de propositions concernant les phénomènes étudiés, qui peuvent être soumises au test de l'expérience et qui sont susceptibles d'être remises en cause). Ces connaissances préalables et ces hypothèses sont au cœur d'une activité scientifique *de nature théorique* qui précède généralement les observations et les expériences. Ce point a d'abord été souligné par plusieurs auteurs tels que Duhem (1981 [1906]) et Bachelard (1999 [1934], 2004 [1938], 1994 [1949]) dans la première partie du XXe siècle, puis progressivement adopté de façon consensuelle en épistémologie.

Le rôle joué par les hypothèses dans les activités scientifiques, d'après Cariou (2011), a longtemps été occulté dans l'histoire des sciences, et par suite, également dans l'enseignement des sciences, par exemple dans la leçon de choses. En rupture avec une telle approche de l'enseignement, les textes officiels préconisant l'IBSE accordent une place importante non seulement aux hypothèses, mais aussi au questionnement qui peut conduire à ces hypothèses (NRC, 1996, p. 6, NRC, 2012, p. 59, MEN, 2008, p. 4, MEN, p. 183). Dans le cadre de l'IBSE, ce questionnement peut s'appuyer sur les connaissances scientifiques préalablement acquises par les élèves ou sur leurs conceptions initiales. Ces dernières jouent alors un rôle comparable aux connaissances préalables des scientifiques dans les démarches d'investigation. Les hypothèses émises par les élèves sont alors parfois l'expression ou la conséquence de telles conceptions. À cet égard, on peut repérer chez les didacticiens des sciences une seconde motivation pour s'intéresser aux conceptions dans le cadre de l'IBSE ayant pour référence, non plus la psychologie du développement cognitif mais l'épistémologie. Concernant ce rapprochement entre conceptions initiales et hypothèses, certains auteurs, tels que Gil-Pérez (1993) ou Vosniadou et Ioannides (1998), soutiennent que pour favoriser les apprentissages des élèves et, plus précisément, pour qu'ils soient prêts à dépasser leurs conceptions initiales erronées, il est essentiel qu'ils prennent conscience que ces dernières peuvent donner lieu à la formulation d'hypothèses et qu'ainsi elles sont susceptibles indirectement d'être confrontées à des expériences pouvant potentiellement les remettre en cause. Vosniadou et Ioannides (1998, p. 1227) parlent à ce propos de « conscience métaconceptuelle ». Le rôle possible de la métacognition à cet égard est également mis en avant par d'autres auteurs (White & Gunstone, 1989, Blank, 2000).

Le rôle des problèmes

D'après les textes officiels (ex : NRC, 1996, MEN, 2008), le rôle crucial assigné à une « question » pour motiver et guider une investigation peut aussi être joué par un « problème ». Dans la littérature anglo-saxonne en didactique des sciences, certains auteurs mettent cette notion au cœur de l'IBSE qu'ils décrivent en termes de résolution de problème ; on parle alors de « *Problem-Based Science Teaching* » (PBST) qui correspond à une variante de l'IBSE (Pizzini et al., 1989, Gallagher et al., 1995, Chin & Chia, 2004). D'après ces auteurs, la résolution d'un problème nécessite le recours à des connaissances nouvelles, ce qui offre ainsi aux élèves l'occasion de « construire » ces connaissances. Une approche centrée sur les problèmes a également été développée dans la littérature francophone. La

spécificité de cette approche, que l'on ne retrouve pas dans la PBST, est de considérer que le problème lui-même doit être « construit » par les élèves.

Cette approche française (je me suis amusé à parler de « *French touch* », Bächtold, 2013e) est fortement inspirée par l'épistémologie de Bachelard (1999 [1934], 2004 [1938], 1994 [1949]). D'après Bachelard, connaître implique une activité intellectuelle qui consiste notamment à situer l'information dans le cadre d'un questionnement, à l'interpréter comme une réponse à un problème ; or, selon lui, la signification du problème n'est pas évidente : le problème, en effet, n'est pas une simple question isolée ; il ne se pose que par rapport à des connaissances préalables. Soulignons que les problèmes, pour Bachelard, se trouvent au cœur du développement des sciences : les connaissances ne sont pas cumulatives, mais sont en permanence révisées, et ce, dans une dynamique d'identification d'erreurs dans les connaissances préalables, c'est-à-dire de construction de problèmes, et de « rectification » de ces erreurs, c'est-à-dire de résolution de ces problèmes (1999 [1934], p. 178, 2004 [1938], pp. 13 et 285).

Cette idée de la « construction du problème » par les élèves a d'abord été mise en avant en didactique des mathématiques par Brousseau (1988, pp. 324-326) qui parle de « dévolution » du problème de l'enseignant aux élèves : le problème devient celui des élèves qui en acceptent la « responsabilité », c'est-à-dire que ces derniers doivent non seulement comprendre le problème, mais aussi s'engager dans l'activité de sa résolution ; pour que les élèves s'approprient le problème, il convient de les mettre face à une « situation » où celui-ci peut devenir manifeste, d'où l'expression « situation-problème » (notion développée au même moment en sciences de l'éducation par Meirieu). Cette dernière notion a ensuite été adaptée et développée en didactique de la physique, en particulier par Robardet (1990, 2001) : l'appropriation du problème par les élèves est essentielle pour créer chez eux le « besoin de résoudre » (1990, p. 22) ; la situation présentée aux élèves doit pour cela « rester concrète et bien accessible aux élèves » (2001, p. 1188), mais également « ouverte », par exemple sans présenter des données qui induisent déjà une démarche de résolution – point également mis en avant par d'autres auteurs (Gil-Pérez et al., 1987, Dumas-Carré & Goffard, 1997). S'appuyant sur la notion de problème développée dans une approche pragmatiste par Dewey (voir à ce sujet Fabre, 2009), Fabre et Orange (1997) ont également exploré la notion de situation-problème en insistant sur le fait que le problème doit être « construit » ou « reconstruit » par les élèves (ces auteurs parlent également de « problématisation ») : ceux-ci doivent identifier les « contraintes » de la situation et explorer les « possibles », c'est-à-dire les solutions envisageables du problème étant données les contraintes (pp. 38, note 2, 40 et 43) – cette construction du problème ne pouvant se faire que dans un « cadre théorique défini » (*ibid.*, p. 40, Orange, 2005, p. 9).

La charge théorique des données

La seconde objection adressée à l'inductivisme par les épistémologues concerne les données d'observation et d'expérience elles-mêmes : celles-ci ne sont jamais neutres, elles sont toujours « chargées de théorie », c'est-à-dire investies d'une interprétation qui dépend des théories ou des conceptions admises jusque-là. Ce point a été formulé notamment par Duhem (1981 [1906]), Hanson (2001 [1958]) et Kuhn (1983 [1962]). Pour préciser ce point, il convient de distinguer deux idées : tout énoncé d'observation ou d'expérience est chargé de théorie / toute observation ou expérience est chargée de théorie. Si la première idée fait consensus chez les épistémologues, la seconde reste encore discutée (Fodor, 1984, Churchland, 1988). Ce point peut aussi être exprimé ainsi : ce que l'on voit ou dit voir, lors d'une observation ou d'une expérience, dépend toujours des lunettes de nos connaissances

préalables. Selon Hanson (2001 [1958], p. 21) : « Le visiteur doit apprendre un peu de physique avant d'être capable de voir ce que voit le physicien ». Je propose de modifier légèrement cette phrase pour l'appliquer au contexte scolaire : « Les élèves doivent apprendre un peu de physique avant d'être capable de voir ce que voit l'enseignant ». Par exemple, les élèves à l'école primaire ne voient pas d'emblée le phénomène de la fusion de la glace comme le changement d'état d'une même substance.

Ce point n'a été que peu discuté par les didacticiens des sciences en lien avec l'IBSE. Toutefois, de fait, il est indirectement pris en charge par l'IBSE : lorsque, dans une situation de départ, l'enseignant présente ou évoque des phénomènes et fait émerger les conceptions initiales des élèves, il est supposé tacitement que les élèves appréhendent ces phénomènes à travers le filtre de leurs conceptions initiales. Calmettes (2000, p. 221) illustre cette idée selon laquelle les conceptions « opèrent au niveau de la perception » avec plusieurs exemples comme celui de l'observation des ombres ou de l'orientation de la surface de l'eau. Une attention à la charge théorique des données mérite aussi d'être portée lors du constat des résultats d'une investigation : parce que l'état de leurs connaissances est différent, les élèves ne constatent pas nécessairement la même chose que l'enseignant. Autrement dit, les données auxquelles sont confrontés les élèves lors d'une investigation ne parlent pas d'elles-mêmes ; il s'agit de les interpréter, de leur donner sens à la lumière d'un modèle ou d'une théorie. Ce point a été pris en compte par des chercheurs centrés sur l'argumentation dans l'enseignement des sciences, dont certains font explicitement référence aux épistémologues tels que Hanson et Kuhn (c'est le cas dans Driver, Asoko et al., 2000) : ces chercheurs soulignent que l'interprétation des données peut être le lieu d'une discussion argumentée où les élèves confrontent plusieurs modèles ou théories (Driver et al., 2000, p. 295 ; Buty & Plantin, 2008, p. 278).

La sous-détermination de la théorie par l'expérience

Une troisième objection, qui a été formulée par les épistémologues contre l'inductivisme, n'a semble-t-il pas été pris en compte dans le cadre de l'IBSE, ni par les auteurs des textes officiels, ni par les didacticiens des sciences. Il s'agit de la « sous-détermination de la théorie par l'expérience ». Ce point qui a été avancé notamment par Duhem (1981 [1906]), Quine (1975) ou van Fraassen (1980) est le suivant : il existe en principe toujours plusieurs théories pouvant rendre compte d'un ensemble de données d'observations ou d'expériences ; autrement dit, ces dernières ne déterminent que partiellement (elles « sous-déterminent ») la théorie qui permet d'en rendre compte. Par exemple, à l'époque de Copernic, les données d'observations astronomiques sous-déterminaient la conception de l'Univers, de sorte que le géocentrisme et l'héliocentrisme étaient tous deux des conceptions défendables au regard de l'expérience.

Ce point remet en cause la leçon de choses, suivant laquelle les élèves, à partir d'observations et d'expériences, devraient induire les connaissances scientifiques, celles qui sont acceptées en sciences et qui sont inscrites dans les programmes. À mon sens, ce point mériterait d'être pris en compte dans le cadre de l'IBSE, en particulier dans l'approche centrée sur les modèles. En effet, les investigations des élèves peuvent en principe aboutir à des modèles valides *a priori* qui diffèrent de celles visées par l'enseignant pour expliquer ou rendre compte des phénomènes en jeu. Par exemple concernant le phénomène de l'alternance des journées et des nuits, les investigations reposant sur la manipulation d'une maquette du système Terre-Soleil peuvent conduire à différents modèles explicatifs acceptables au regard des données. La prise en compte de ce point permet de mettre en lumière et discuter ce que fait (ou pourrait faire) l'enseignement pour assurer que, en fin de

compte, les élèves cheminent vers les connaissances scientifiques qui sont visés par l'enseignant.

Le tournant pratique en épistémologie

Sans lien direct avec la critique de l'inductivisme, on peut relever un autre aspect des sciences qui a été pris en compte dans l'IBSE, mais discuté de façon explicite il n'y a que peu d'années : il s'agit de l'importance, de la complexité et de la diversité des pratiques scientifiques. Du côté de l'épistémologie, l'attention portée aux pratiques scientifiques est aussi relativement tardive, en l'occurrence à partir des années 1970. Comme le souligne Soler et al. (2014), ce qui est appelé le « tournant pratique » en philosophie des sciences a été opéré en parallèle par deux courants épistémologiques, celui de la sociologie des sciences (avec des auteurs tels que Bloor, Pickering, Latour et Woolgar) et celui du « nouvel expérimentalisme » en philosophie des sciences (avec des auteurs tels que Hacking, Franklin, Galison et Cartwright). Dans ces deux courants, il a été reproché aux épistémologues de s'être jusque-là trop focalisés sur les théories, d'être normatifs et d'avoir idéalisé l'expérience en réduisant son rôle à celui de tester la théorie. En positif et par contraste, les épistémologues du tournant pratique ont examiné la science telle qu'elle se fait, c'est-à-dire les pratiques effectives et contextualisées des scientifiques. Ainsi par exemple, ils ont mis en évidence les processus de construction et de négociation longs et complexes qui précèdent la stabilisation des connaissances et le fait que ces processus sont ensuite généralement gommés par les scientifiques pour avancer plus efficacement (Latour & Woolgar, 1988 [1979]) ; ils ont montré que la théorie intervient à différents niveaux de l'expérimentation, pas seulement pour interpréter les résultats mais aussi pour concevoir et décrire les instruments (Galison, 2002 [1987]) ; ou encore, ils ont remis en cause une conception contemplative des sciences en mettant en avant l'image de scientifiques qui à l'aide de leurs instruments, auxquels ils attribuent un rôle actif, interagissent avec le monde physique et créent des phénomènes (Hacking, 1989 [1983], Pickering, 1995)

De fait, dans le cadre de l'IBSE, il est question de faire pratiquer aux élèves des démarches de nature scientifique. Cependant, à cet égard, peu de didacticiens des sciences ont explicitement fait référence à des épistémologues du tournant pratique. C'est le cas de Driver, Asoko et leurs collègues (1994) qui se réfèrent plus spécifiquement aux sociologues des sciences tels que Collins, Latour et Woolgar, pour développer leur approche en termes d'« acculturation » (voir plus haut, section 4.2). D'après ces auteurs, l'enseignement des sciences doit être à l'image des pratiques scientifiques dans leurs aspects discursifs et consister notamment à acculturer les élèves à des activités de communication et d'argumentation à propos des modèles. Certains auteurs (Driver elle-même et des auteurs ayant collaboré avec elle) centrés davantage sur l'argumentation dans l'enseignement des sciences (sans forcément se situer dans le cadre de l'IBSE) se sont également appuyés sur ces éclairages de la sociologie des sciences (Driver et al., 2000, Duschl & Osborne, 2002, Erduran et al., 2004). Je reviendrai sur l'argumentation plus largement dans le contexte scolaire dans la partie 5. L'évolution des textes de la NRC aux Etats-Unis donne une indication concernant la prise en compte récente de cette source théorique issue de l'épistémologie pour penser l'IBSE : dans le texte de 1996 (NRC, 1996), on ne relève aucune référence à ce courant, ce qui n'est plus le cas de celui de 2012 (NRC, 2012), qui fait mention de livres de Pickering, Collins, Latour et Woolgar notamment.

4.4 Deux manières de concevoir l'enseignement par démarches d'investigation

Des éléments présentés ci-dessus (sections 4.2 et 4.3), il ressort que la psychologie du développement cognitif et l'épistémologie constituent deux sources théoriques qui ont nourri conjointement la réflexion des didacticiens des sciences pour développer l'IBSE et plus généralement une approche constructiviste de l'enseignement des sciences. En particulier, il ressort que certains ingrédients de l'IBSE sont motivés par des éclairages de ces deux domaines. Il en va par exemple ainsi de l'importance accordée aux conceptions initiales des élèves ou du rôle moteur assigné au « conflit » ou « problème » pour la motivation et l'engagement des élèves dans les investigations. De prime abord, on pourrait penser que la psychologie du développement cognitif et l'épistémologie conduisent à une même conception de l'IBSE et de l'apprentissage des élèves, de ce qu'ils y « construisent ». Cependant, si l'on considère attentivement les contributions de ces deux domaines, il apparaît qu'elles dessinent les contours de deux conceptions différentes. Dans les deux articles mentionnés plus haut (Bächtold, 2012a, 2013e), j'ai proposé de distinguer ces deux conceptions comme suit. Dans le cadre d'une démarche d'investigation en classe, les processus de « construction » dont sont acteurs les élèves peuvent être vus :

- Comme une *extension* dans la classe des processus cognitifs prenant place avant enseignement et en dehors de la classe, à savoir des processus par lesquels les élèves, faces à des conflits (socio-)cognitifs, « construisent » des structures cognitives, c'est-à-dire adaptent (enrichissent et/ou réorganisent) ces structures cognitives à leur environnement matériel et social (suivant la perspective issue de la psychologie du développement cognitif) ;
- Ou comme *analogues* aux activités des chercheurs lorsque, face à des problèmes scientifiques, ils « construisent » collectivement de nouvelles connaissances, c'est-à-dire établissent de nouveaux faits, développent de nouveaux modèles ou de nouvelles théories (suivant la perspective issue de l'épistémologie).

Cette double perspective n'est pas toujours clairement reconnue dans la littérature et génère une certaine ambiguïté concernant ce que les élèves sont censés « construire ». Cette ambiguïté se retrouve par exemple dans deux théories constructivistes de l'enseignement parmi les plus discutées, la théorie du changement conceptuel (Posner et al., 1982) et le constructivisme radical (von Glasersfeld, 1995, 1998 [1989]). Dans la théorie du changement conceptuel, les élèves sont supposés construire des « concepts » ou des « conceptions », ceux deux termes étant pris comme synonymes, ce qui est pourtant fort discutable (voir ci-dessous). Suivant le constructivisme radical, les élèves sont supposés construire des « concepts » ou « structures cognitives », ce qui implique la construction de « connaissances », sans que soit précisés la différence et le lien entre les deux.

Afin de clarifier leurs intentions et leurs stratégies didactiques, les différentes approches constructivistes de l'enseignement qui emploient le terme « construire » devraient préciser ce que les élèves sont censés « construire » et lever les ambiguïtés comme celles mentionnées ci-dessus. Dans cette optique, j'ai proposé plusieurs distinctions et définitions que je présente ici de façon synthétique (pour plus de détail, voir Bächtold, 2013e). Ces définitions se veulent provisoires et sont susceptibles d'être affinées. En premier lieu, suivant plusieurs auteurs (Vosniadou & Ionnides, 1998 and Gobert & Buckley, 2000), on peut distinguer dans l'activité cognitive d'un sujet :

- Le niveau mental : non explicite et non communicable ;
- Le niveau symbolique : explicite et communicable.

Au niveau mental, on peut situer les concepts et les structures cognitives et, au niveau symbolique, les expressions symboliques des concepts, les conceptions, les modèles et les théories.

Un « concept » est usuellement défini en psychologie cognitive comme une « représentation mentale » (Laurence & Margolis, 1999, p. 5; Carey, 2009, p. 5). Plus précisément, dans un esprit pragmatiste, je propose de définir un concept comme la représentation mentale d'un objet (de la propriété d'un objet, d'un événement ou d'un processus) qui fait référence, souvent de façon implicite seulement, à un ensemble d'éléments considérés par le sujet comme des instances de l'objet représenté en vertu de certaines de leurs propriétés. Mental par nature, un concept peut être utilisé par un sujet sans devenir explicite et communicable, voire sans que le sujet ait conscience de l'utiliser. Cependant, un concept peut être rendu explicite, c'est-à-dire exprimé et manipulé au moyen de symboles.

Parmi les concepts, on peut faire une distinction (inspirée de Vygotski, 1997 [1934]) entre ceux construits par le sujet lui-même, spontanément, de façon inconsciente et sur la base de ses propres expériences, pouvant être appelés des « concepts spontanés » (ex : objet permanent, espace, temps, nombre...) et ceux construits collectivement par les êtres humains appartenant à une certaine culture, pouvant être appelés des « concepts socio-culturels » (ex : livre, bouteille, gène, électron, énergie...). Il convient de souligner que certains concepts sont construits spontanément par le sujet lui-même, puis reliés à (ou remplacés par, ou en interaction avec) des concepts socio-culturels correspondants appris par le sujet à travers ses interactions sociales (ex : espace, nombre). De plus, les concepts socio-culturels sont explicites et communicables et donc se situent à la fois aux niveaux mental et symbolique.

En psychologie cognitive, on considère habituellement une « structure cognitive » comme une catégorie plus large qu'un concept, ce dernier étant un cas particulier de structure cognitive. Les types de structures cognitives sont variés : un concept, un réseau de concepts, un mode de raisonnement... Les structures cognitives peuvent être définies comme des structures mentales qui rendent possibles la cognition (ex : une perception, un raisonnement, un souvenir).

Le terme « conception », souvent employé dans la littérature en didactique des sciences, est entendu dans ce domaine comme une représentation, une sorte de modèle ou de « mini-théorie » (expression de Claxton, cité par Driver & Oldham, 1986). Bien que construits de façon différente et avec des domaines de validité généralement différents, conception, modèle et théorie sont trois types de représentation similaires : ils reposent sur un ensemble d'hypothèses concernant le monde (chaque hypothèse étant basée sur la mise en relation spécifique de certains concepts) ; ils ont pour fonction de décrire, expliquer et/ou prédire certains phénomènes ; ils se situent tous trois au niveau symbolique.

Ces distinctions et définitions peuvent nous aider à décrire ce qui est en jeu dans le cadre de l'IBSE. Elles nous permettent de faire la distinction entre deux facettes de l'apprentissage des sciences :

- La « construction » (ou autrement dit, l'appropriation) par les élèves, au niveau symbolique, de concepts scientifiques (des construits socio-culturels), de modèles ou de théories, qui correspondent aux connaissances scientifiques inscrites dans les programmes ;
- La « construction » (ou autrement dit, le développement) par les élèves, au niveau mental, de structures cognitives (et en particulier, de concepts et de modes de

raisonnement), qui sont nécessaires à l'appropriation de ces concepts scientifiques, modèles et théories.

Bien que ces deux types de construction puissent être distingués, ils semblent étroitement liés. Une connaissance précise concernant les structures cognitives requises pour comprendre et intégrer un nouveau modèle ou une nouvelle théorie introduite en classe semble importante pour proposer un enseignement par démarche d'investigation qui soit efficace. En particulier, cette connaissance peut aider à déterminer le guidage que l'enseignant apporte à ces élèves au cours de leurs investigations : par exemple, pour déterminer quels outils conceptuels il devrait introduire ou quel mode de raisonnement il devrait favoriser.

4.5 La vision des sciences à l'école : enjeux éducatifs et stratégies didactiques

L'un des arguments invoqués pour promouvoir l'IBSE est qu'elle offre une occasion de développer la vision des sciences des élèves ou, suivant l'expression consacrée dans la littérature en didactique des sciences, leur vision de la « nature de la science » (« *nature of science* », NOS). Par exemple, dans le texte officiel de référence pour l'enseignement des sciences aux États-Unis (NRC, 2012, p. 78), on peut lire « l'opportunité pour les élèves d'apprendre la base des pratiques décrites dans ce chapitre [dans le cadre de l'IBSE] est aussi une opportunité pour eux de prendre du recul et de développer une réflexion sur la manière dont ces pratiques contribuent à l'accumulation des connaissances scientifiques ».

Dans cette section, je vais présenter les enjeux éducatifs associés à la vision des sciences des élèves, les stratégies didactiques pour la développer, puis aborder la question de la formation des enseignants à ce sujet. Le projet FORMSCIENCES sera ensuite brièvement décrit (section 4.6). J'expliquerai comment il nous a conduits, avec David Cross et Valérie Munier, à étudier la question de l'évaluation de la vision des sciences des enseignants. Je mènerai une discussion épistémologique et présenterai des résultats empiriques interrogeant l'approche qui fait référence à cet égard (celle de Lederman et ses collègues). Je reviendrai ensuite sur la question des liens complexes entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques de l'IBSE (et plus généralement, leurs pratiques d'enseignement des sciences), cette question ouvrant pour nous un nouveau champ d'exploration (section 4.7).

Le développement de la vision des sciences des élèves

Selon certains textes officiels, développer la vision des sciences des élèves constitue un enjeu éducatif très important, voire correspond à l'élément « central » de la culture scientifique (« *scientific literacy* ») qu'ils doivent acquérir (Hodson, 2014, p. 914). Quels sont les arguments avancés ? Hodson (2014, pp. 915-916) dresse la liste des principaux arguments mis en avant dans la littérature : une meilleure compréhension du fonctionnement des sciences favorise l'apprentissage des connaissances scientifiques, génère de l'intérêt pour les sciences et possiblement incite à s'engager dans des carrières scientifiques, développe la capacité des élèves à prendre des décisions éclairées sur des questions socio-scientifiques et, ainsi, contribue au développement de la démocratie. Toutefois, comme le souligne Lederman (2007, p. 832), les arguments invoqués pour développer la vision des sciences des élèves sont avant tout « intuitifs » et n'ont pas encore été étayés par de nombreuses études empiriques.

Comment développer la vision des sciences des élèves ? L'idée mentionnée ci-dessus selon laquelle l'IBSE offre un contexte propice à cet égard est en fait à considérer avec précaution. Plusieurs études empiriques ont montré qu'il ne suffit pas de mettre les élèves

en situation de pratiquer des activités de nature scientifique pour qu'ils développent leur vision des sciences (« approche implicite »); une discussion « explicite » de nature épistémologique sur certains aspects de ces activités est nécessaire (« approche explicite ») (Khishfe & Abd-El-Khalick, 2002, Akerson & Volrich, 2006).

Ce point a été identifié comme crucial concernant les différentes stratégies didactiques pour développer la vision des sciences des élèves. Outre la stratégie basée sur les activités scientifiques vécues par les élèves, deux autres stratégies peuvent être identifiées dans la littérature : celle qui s'appuie sur l'étude d'épisodes de l'histoire des sciences et celle qui consiste à explorer des controverses socio-scientifiques. À propos de la stratégie basée sur l'histoire des sciences, plusieurs recherches ont montré qu'elles ne permettent pas de faire évoluer la vision des sciences des élèves, à moins que l'enseignant traite explicitement des points d'épistémologie avec ses élèves (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000, Rudge & Howe, 2009). De même, les résultats ne sont positifs avec une stratégie basée sur les controverses socio-scientifiques que si une discussion épistémologique est menée (Karisan et Zeidler, 2017, p. 144).

D'après Karisan et Zeidler (2017, pp. 143-144), un second critère est décisif pour faire évoluer la vision des sciences des élèves : la discussion sur les sciences menée en classe doit être « contextualisée », c'est-à-dire porter sur des exemples concrets. De fait, ce critère est un dénominateur commun aux trois stratégies mentionnées ci-dessus.

Pourquoi mener une discussion avec les élèves sur des points d'épistémologie plutôt que de leur enseigner directement ces points ? Plusieurs chercheurs ayant développé et étudié une approche explicite qualifient également leur approche de « réflexive » (ex : Khishfe & Abd-El-Khalick, 2002, Akerson & Volrich, 2006, Rudge & Howe, 2009). D'après Akerson et Volrich (2006, p. 378), un enseignement est « explicite » si les élèves sont invités à réfléchir à la manière dont certains aspects de leurs propres activités peuvent être mises en perspective avec celles de scientifiques et ainsi illustrer des points d'épistémologie. Pour Rudge et Howe (2009, p. 564), qui ne parlent pas de réflexion des élèves sur leurs propres activités, la réflexion doit porter sur des exemples particuliers et surtout être à la charge des élèves. L'idée générale de l'approche explicite et réflexive semble donc consister à mener des discussions avec les élèves de sorte qu'ils puissent développer eux-mêmes une réflexion sur des points d'épistémologie.

À noter que ces auteurs s'inscrivent dans la ligne de Lederman et Abd-El-Khalick (Abd-El-Khalick, 2001, Lederman et al., 2002, Lederman, 2007), lesquels ont identifié un ensemble de 8 points concernant « la nature de la science » qui sont supposés faire consensus dans le domaine de l'épistémologie et qui méritent d'être enseignés à l'école : la nature empirique de la connaissance scientifique ; la distinction entre observation, inférence et entités théoriques en science ; la distinction entre théories scientifiques et lois ; la créativité et l'imagination en science ; la charge théorique dans la connaissance scientifique ; les influences sociales et culturelles ; le mythe de la méthode scientifique ; la nature provisoire de la connaissance scientifique (Lederman et al., 2002 ; ces points seront discutés plus loin, section 4.7). Les partisans de l'approche explicite et réflexive mentionnés ci-dessus considèrent que celle-ci vise à aider les élèves à comprendre ces différents points d'épistémologie.

En rupture avec Lederman et Abd-El-Khalick, Matthews (2012) soutient l'idée que le développement de la vision des sciences des élèves ne devrait pas consister à faire apprendre aux élèves des points d'épistémologie, mais à développer chez eux une posture critique sur les sciences, peu importe les aspects des sciences qui sont considérés. Il estime

que les 8 points de Lederman et Abd-El-Khalick font figure d'une « checklist » et sont devenus, malgré leurs auteurs, une forme de « catéchisme », en rupture avec l'esprit même de l'histoire et de la philosophie des sciences (Matthews, 2012). Bien qu'il ne le dise pas expressément, Matthews semble néanmoins d'accord avec l'idée d'une approche explicite et réflexive : l'objectif est de susciter chez les élèves un questionnement critique sur les différents aspects des sciences. Mais ces aspects (« features of science »), selon lui, ne doivent pas être tirés d'une liste de points d'épistémologie avec des conclusions déjà établies. Il s'agit d'amorcer une discussion ouverte sur divers aspects (à commencer par l'usage des termes communs tels que « loi », « modèle », « vérité », « hypothèse », « observation »...), afin que chaque élève puisse développer et argumenter en faveur de son propre point de vue épistémologique.

Au point de départ de ces recherches sur les stratégies didactiques pour développer la vision des sciences des élèves se trouvent les résultats négatifs des nombreuses études qui ont été réalisées auprès d'élèves concernant leur vision des sciences. Dans une synthèse de ces études menées depuis les années 1960, Lederman (2007, pp. 836-838) restitue un ensemble de conceptions « naïves » ou « inadéquates » identifiées chez les élèves du primaire au secondaire (ex : les hypothèses peuvent être prouvées par vérification ; la recherche scientifique révèle des vérités irréfutables ; les lois représentent une vérité irréfutable) ou de points d'épistémologie « non compris » par eux (ex : l'importance de la mise à l'épreuve expérimentale, le caractère provisoire des connaissances scientifiques ; leur caractère partiellement subjectif). On peut voir aussi ces conceptions naïves ou ces points d'épistémologie non compris (suivant la perspective de Lederman et Abd-El-Khalick) comme l'expression d'une posture non critique à propos des sciences (suivant la perspective de Matthews).

Dans ce qui suit, je propose de distinguer « vision des sciences naïve et non critique » et « vision des sciences riche et critique », avec les adjectifs « naïf et riche » qui renvoient à un niveau de connaissance concernant les sciences, en référence à des points consensuels en épistémologie, et les adjectifs « critique et non critique » qui renvoient à une posture de questionnement ou d'absence d'une telle posture concernant les différents aspects des sciences.

Une question qui se pose est celle de l'origine de cette vision des sciences naïve et non critique chez les élèves. De fait, une telle vision est repérée également chez les élèves en fin scolarité. On peut donc se demander si l'enseignement traditionnel des sciences ne véhicule pas une certaine épistémologie qui favoriserait le développement de cette vision naïve et non critique des sciences.

Un premier indice allant dans ce sens peut être trouvé dans l'analyse des manuels supports à l'enseignement des sciences. En menant une telle analyse, McComas (1998) a mis au jour un ensemble de « mythes » dont seraient porteurs les manuels, soit parce qu'ils comportent des idées erronées, soit en raison d'un défaut de clarification. En voici quelques exemples : les hypothèses peuvent devenir des théories, puis devenir des lois ; les lois scientifiques sont absolues ; il existe une méthode scientifique universelle et générale ; des preuves accumulées avec précaution permettent d'obtenir une connaissance certaine ; les scientifiques sont particulièrement objectifs ; les expériences constituent la principale route vers la connaissance scientifique. À noter que Lederman et Abd-El-Khalick se sont inspirés de cette liste de McComas pour formuler, en positif, les points d'épistémologie mentionnés plus haut.

La vision des sciences des enseignants et la question de leur formation

Cette idée selon laquelle l'épistémologie véhiculée dans l'enseignement traditionnel des sciences est naïve est également suggérée par le fait que la vision des sciences des enseignants est elle-même généralement naïve. C'est ce que de nombreuses études ont permis de mettre en évidence (Lederman, 2007, pp. 838-842). Si les enseignants n'ont pas une vision des sciences riche et critique, il est peu probable que leur enseignement des sciences soit tel qu'il favorise le développement d'une telle vision des sciences chez les élèves. Il convient de souligner néanmoins qu'à l'inverse, si les enseignants ont une vision des sciences qui est riche et critique, il ne s'en suit pas « nécessairement » qu'ils vont mettre en œuvre un enseignement favorisant le développement d'une vision riche et critique chez les élèves (Lederman, 1992, p. 351). De fait, dans les études menées par Lederman (1999) et Bell et al. (2000), les enseignants avec une vision des sciences jugée « adéquate » n'intègrent pas explicitement dans leur enseignement des sciences des points d'épistémologie, notamment parce qu'ils considèrent qu'une discussion épistémologique est très abstraite et ne peut être envisagée uniquement après que les élèves aient acquis les connaissances scientifiques visées (Lederman, 1999, p. 924).

À supposer que les enseignants intègrent effectivement dans leur programmation l'objectif de développer la vision des sciences de leurs élèves, suffit-il qu'ils aient une vision des sciences qui soit riche et critique ? D'après Kim et al. (2005), les enseignants doivent également maîtriser les connaissances scientifiques en jeu, des connaissances pédagogiques générales et des connaissances pédagogiques liées au contenu disciplinaire (« *pedagogical content knowledge* », PCK, suivant la dénomination de Shulman, 1986) qui sont spécifiques à l'enseignement de la « nature de la science » (NOS). La définition de ces PCK (« *PCK for NOS* ») a fait récemment l'objet d'une discussion (Abd-El-Khalick, 2013, van Dijk, 2014). Sans traiter ici directement cette question de définition, nous pouvons considérer *a minima* que les enseignants doivent être formés pour connaître et maîtriser des stratégies didactiques permettant de développer la vision des sciences des élèves (ce qui peut correspondre à un type de PCK pour la NOS).

C'est dans cette perspective qu'Enery Melo, dont j'ai co-encadré la dernière année de doctorat, a développé une formation d'étudiants, futurs enseignants en sciences, visant à développer chez eux une posture critique sur les sciences (dans la ligne de Matthews, 2012) et à leur faire vivre une séquence de formation, analysée et discutée avec eux, dans l'idée qu'ils puissent eux-mêmes la mettre en œuvre dans leurs futures classes (Melo, 2016). La stratégie didactique développée est de type explicite et réflexive (au sens précisé ci-dessus). Elle est basée sur un dispositif original qui consiste à demander aux étudiants d'étudier et de mettre en scène de façon personnalisée un extrait de pièce de théâtre. Cette dernière porte sur un épisode de l'histoire des sciences et offre aux étudiants le support d'une discussion de nature épistémologique. Enery Melo a expérimenté et analysé cette séquence en utilisant un extrait de la pièce « Copenhague », écrite par Frayn, qui imagine une discussion entre Bohr et Heisenberg sur les fondements de la mécanique quantique et se situant dans le contexte de la 2^{nde} guerre mondiale. Les résultats de l'étude se sont révélés positifs : la séquence de formation a permis aux étudiants de faire émerger spontanément dans leur discussion plusieurs questions épistémologiques : celles de la subjectivité en sciences, des liens sciences-société, du statut des modèles et du rôle du questionnement dans le développement des sciences. Ma contribution a consisté à aider Enery Melo dans l'organisation des ingrédients multiples de cette stratégie (qui convoque également le théâtre de Brecht et la théorie de l'apprentissage de Kelly) et à la situer dans la littérature

sur la nature des sciences. Nous avons rédigé ensemble un article qui a été accepté récemment par la revue *Science & Education* (Melo & Bächtold, accepté). Dans ce travail, je me suis appuyé sur mes recherches concernant l'interprétation bohrienne de la mécanique quantique et celles concernant le développement de la vision des sciences des enseignants. Avec Emyr Melo, nous avons pu mettre en évidence le potentiel très riche d'une discussion sur l'interprétation de la mécanique quantique pour initier chez les futurs enseignants une réflexion critique sur les sciences.

4.6 Le projet FORMSCIENCES

Objectifs et méthodes du projet

La question du développement de la vision des sciences des enseignants se trouve au cœur d'un parcours de formation pour les enseignants qui a été mis en place en 2014 par les *Maisons pour la science* (créées en 2012 à l'initiative de l'Académie des sciences, financées par le PIA et coordonnées par la Fondation *La main à la pâte*). Cette formation s'adresse à des enseignants de l'école primaire (CE2 à CM2) et a pour objectif de les aider à mettre en œuvre dans leurs classes un enseignement des sciences de type IBSE (dans la version développée par *La main à la pâte*). L'une des spécificités de cette formation assurée en parallèle par 3 Maisons pour la science (Auvergne, Lorraine et Midi-Pyrénées) est d'être « longue », puisque son volume horaire prévu est de 80 heures et qu'elle se déroule sur 2 années. À l'instar des autres formations des Maisons pour la science, elle entend « faire évoluer durablement les pratiques d'enseignement des sciences à l'école primaire [en mettant] l'accent sur une vision cohérente des sciences expérimentales et d'observation ainsi que des mathématiques [...] », ou autrement dit, en développant chez les enseignants « une représentation concrète de la science contemporaine, de ses processus de pensée et d'action » (Maisons pour la science, 2018). La stratégie préconisée consiste à mettre les enseignants en « contact direct avec la science et ses acteurs » (*Idem*).

Le projet FORMSCIENCES (ANR, 2014-2018) a pour objectif d'étudier l'impact de ce parcours de formation, plus précisément :

- Étudier l'impact de la formation sur les pratiques des enseignants : la formation fait-elle évoluer la manière dont les enseignants de l'école primaire enseignent les sciences et, dans le cas positif, par quels mécanismes ?
- Étudier l'impact indirect de la formation sur les apprentissages des élèves : à supposer que la formation fasse évoluer les pratiques des enseignants (et quelle que soit précisément la nature de cette évolution), cette évolution bénéficie-t-elle aux élèves de l'école primaire dans leurs apprentissages des sciences au sens large (connaissances et compétences) et leur motivation ?

Deux études sont menées et croisées :

- Une *étude quantitative* concernant :
 - Les enseignants : évaluation de leur vision des sciences déclarée, de leur connaissances didactiques et de leurs pratiques d'enseignement déclarées (étude menée par voie de questionnaires et basée sur une comparaison entre un groupe « test » et un groupe « témoin », avec 130 enseignants au total) ;
 - Les élèves : évaluation de leurs connaissances scientifiques, de leurs compétences méthodologiques, de leur vision des sciences et de leur motivation pour les sciences (étude menée au moyen de tests et basée sur une comparaison entre les élèves des enseignants tests et ceux des

enseignants témoins, avec 2694 élèves au total la première année et 2134 élèves la seconde année) ;

- Une *étude qualitative* concernant :
 - Les pratiques d'enseignants (étude basée sur la captation vidéo de séances de classe de 8 enseignants tests, avant, pendant et après la formation, et sur des entretiens après la formation) ;
 - La formation qu'ils ont effectivement reçue (étude basée sur la captation vidéo des séances de formation assurées dans deux Maisons pour la science).

L'équipe constituée pour mener ce projet associe des chercheurs en économie de l'éducation, en psychologie des apprentissages et en didactique des sciences : Marc Gurgand, coordinateur du projet et responsable de l'étude quantitative, Suzanne Bellue et Adrien Bouguen (J-PAL, École d'économie de Paris), André Tricot, responsable de la partie « tests élèves », et Hakim Djerioua (CLLE, Université Toulouse Jean Jaurès), Valérie Munier, responsable de l'étude qualitative, David Cross, Aurélie Chesnais, Céline Lepareur, Luz Martinez, Karine Molvinger et moi-même (LIRDEF, Université de Montpellier).

Les premiers résultats

Une partie des données de l'étude quantitative doit encore être recueillie. Cependant les données disponibles ont déjà été analysées. Les résultats montrent qu'il n'y a globalement pas d'effet positif. La vision des sciences, les connaissances et les pratiques déclarées des enseignants formés n'ont pas évolué de manière significative. Un seul effet significatif ressort : il s'agit du nombre d'heures d'enseignement des sciences effectuées par semaine lors de la seconde année de formation (1,66 h/semaine en moyenne pour les enseignants tests, contre 1,42 h/semaine pour les enseignants témoins). S'agissant des évaluations des élèves, un seul effet positif a été identifié ; il concerne le domaine des connaissances scientifiques : les performances des élèves tests sont légèrement supérieures à celles des élèves témoins. Ce résultat pourrait être interprété simplement comme un effet du plus grand nombre d'heures d'enseignement des sciences auquel les élèves tests ont été exposés. Ces premiers résultats ont été présentés en décembre 2017 (Gurgand et al., 2017, Tricot et al., 2017). Ils devraient faire l'objet d'une publication collective une fois l'ensemble des données recueillies et analysées.

Comment expliquer les effets limités d'un tel parcours de formation ? Dans une synthèse des recherches sur les « croyances » ou « connaissances » des enseignants, Crahay et al. (2010, pp. 106-107) font le constat que les programmes de formation ont généralement un effet limité : les croyances, mais aussi les pratiques, des enseignants sont « relativement imperméa[bles] aux processus de formation ». En ayant à l'esprit ce constat, on ne peut attendre de la formation étudiée qu'elle ait un effet important. Soulignons qu'il s'agissait de la première année de la mise en place de cette formation. Il convient également de remarquer que les enseignants qui ont participé à cette formation (laquelle était ouverte à tous les enseignants de l'école primaire des régions des Maisons pour la science) étaient des enseignants déjà motivés par l'enseignement des sciences et pratiquant déjà initialement relativement beaucoup de sciences dans leurs classes.

L'analyse qualitative de la formation telle qu'elle a été mise en œuvre dans deux Maisons pour la science (formation à laquelle nous étions extérieurs) permet d'apporter d'autres éléments d'explication à ses effets limités. Il apparaît dans les deux cas que la formation est essentiellement orientée vers la transmission d'activités d'enseignement de sciences, avec une organisation par thèmes scientifiques (l'astronomie, l'air, le bois, les systèmes mécaniques...). Céline Lepareur, David Cross et Valérie Munier (2017) ont mené une analyse

plus fine visant à mettre en lumière les connaissances didactiques travaillées en formation. La grille d'analyse a été construite à partir de la classification des PCK de Magnusson et al. (1999). Il ressort que la formation n'est pas structurée pour développer les PCK des enseignants : les PCK traitées en formation le sont de façon isolées les unes des autres ; certaines sont absentes (par exemple, les PCK liée à l'évaluation). Or, à partir d'une revue de la littérature sur les formations d'enseignants en poste (non spécifiquement sur les sciences), Richardson et Placier (2001, p. 921) soulignent un ressort décisif des formations pour faire évoluer les pratiques des enseignants : il s'agit de leur donner l'occasion (par exemple, dans le cadre de discussions entre pairs) de questionner leurs propres pratiques et connaissances didactiques (leurs « croyances » sur l'enseignement), notamment en discutant les activités qu'ils mettent en œuvre et qui ne leur semblent pas efficaces.

Qu'en est-il en particulier de la vision des sciences des enseignants ? Conformément à la stratégie des Maisons pour la science évoquée ci-dessus, des scientifiques (biologistes et physiciens) interviennent dans la formation pour permettre un contact des enseignants avec la « science vivante » (Maisons pour la science, 2018). Cependant, si les scientifiques donnent parfois à voir aux enseignants certains aspects de leurs pratiques et de leurs méthodologies de recherche, cela n'est pas systématique et ceux-ci ne font pas l'objet d'une discussion épistémologique. L'approche peut être qualifiée d'« implicite ». Suivant les études empiriques évoquées plus haut (section 4.5), il n'est donc pas surprenant que les formations aient peu ou pas d'impact sur la vision des sciences des enseignants. Laissant implicites les questions d'épistémologie, les formations observées ne traitent pas non plus des stratégies didactiques pour aborder des points d'épistémologie en classe, ni ne discutent, à partir de points d'épistémologie, les manières possible d'enseigner les sciences par démarches d'investigation (ce qui est pourtant l'objectif affiché par les Maisons pour la science, comme indiqué ci-dessus).

4.7 Comment évaluer la vision des sciences des enseignants ?

Ce projet FORMSCIENCES a été l'occasion de mener une recherche spécifique sur la caractérisation de la vision des sciences des enseignants. Nous avons la contrainte d'utiliser ou d'élaborer un outil qui permette d'évaluer la vision des sciences d'un grand nombre d'enseignants (>200) sur un temps court (<30 min). Cette contrainte a exclu l'option des entretiens et nous a conduits à examiner les questionnaires sur la vision des sciences disponibles dans la littérature. Le questionnaire qui fait aujourd'hui référence dans le domaine NOS est celui développé par Lederman et al. (2002) appelé « VNOS » (« *Views of Nature Of Science* »). Il a été utilisé par de nombreux chercheurs pour étudier la vision des sciences d'élèves, d'étudiants et d'enseignants, mais aussi pour évaluer l'impact de formations et d'enseignements centrées sur NOS (Akerson & Vorlich, 2006, Akerson & Hanuscin, 2007, Akerson et al., 2009, Yacoubian & Boujaoude, 2010, Hanuscin et al., 2011, Rudge et al., 2013, etc.). En complément de ce questionnaire centré sur la « nature » des connaissances scientifiques, Lederman et al. (2014) ont élaboré plus récemment un second questionnaire centré sur la « nature » des méthodes scientifiques, appelé « VASI » (« *View About Scientific Inquiry* »). Ces deux questionnaires nous sont apparus comme constituant un point de départ intéressant pour élaborer notre propre questionnaire, appelé VOS (« *View of Science* »). Cependant, ce dernier se distingue de VNOS et VASI à plusieurs égards. Dans ce qui suit, je vais présenter d'abord la raison de notre intérêt pour ces questionnaires, puis nos divergences, d'une part sur le plan épistémologique et d'autre part sur le plan méthodologique.

La question de la catégorisation de la vision des sciences des enseignants

Certaines approches pour évaluer la vision des sciences des enseignants, qui sont minoritaires aujourd'hui, cherchent à la catégoriser suivant une grille de conceptions épistémologiques identifiées *a priori* en référence à la littérature en philosophie des sciences. Ainsi, Kang et al. (2005) ou Park et Lee (2009) qualifient les diverses visions des sciences des enseignants comme étant alternativement empiristes, inductivistes, instrumentalistes, relativistes ou réalistes. Mais que signifie que la vision des sciences d'un enseignant est par exemple « instrumentaliste » ? L'enseignant en a-t-il conscience ? A-t-il une position instrumentaliste stable et cohérente, c'est-à-dire qui concerne tous les modèles et toutes les théories, quel que soit le domaine considéré ? Plusieurs études mettent en cause cette idée (Guerra, 2012). Comme le soulignent Nott et Wellington (1996), les enseignants ne sont pas des philosophes des sciences « professionnels ». Ainsi, leur travail n'est pas d'étudier le fonctionnement des sciences et le statut des connaissances scientifiques ; leur préoccupation n'est pas de se constituer une conception globale et cohérente des sciences. Par conséquent, il apparaît discutable de chercher à mettre la vision des sciences des enseignants dans le moule de conceptions épistémologiques globales correspondant à celles défendues ou critiquées par les philosophes des sciences.

De façon alternative, plusieurs chercheurs, dont Lederman et ses collègues (2002, 2014), ont proposé de caractériser la vision des sciences des enseignants en distinguant un ensemble de points d'épistémologie et en évaluant leur niveau d'expertise sur chacun de ces points pris isolément. Cette approche nous semble pertinente pour échapper à l'objection précédente (bien qu'elle n'ait pas été explicitement justifiée de cette manière). C'est vers celle-ci que nous nous sommes donc tournés.

La distinction entre NOS et SI : une critique sur le plan épistémologique

Lederman et ses collègues (2002, 2007, 2014) opèrent une distinction entre ce qu'ils nomment la « nature de la science » (« *nature of science* », NOS) et l'« enquête scientifique » (« *scientific inquiry* », SI). Ils précisent ce que recouvrent les deux dénominations en ces termes : « La nature de la science (NOS) comprend ce qui fait que la science est différente d'autres disciplines comme l'histoire ou la religion. NOS fait référence aux caractéristiques de la connaissance scientifique qui sont nécessairement dérivées de la manière dont la connaissance est développée. L'enquête scientifique (SI) ce sont les processus correspondant à comment les scientifiques font leur travail et comment la connaissance scientifique qui en résulte est générée et acceptée » (Lederman et al., 2014, p. 66). Reconnaissant qu'il existe une interdépendance entre ces deux facettes des sciences, entre NOS et SI, ils estiment cependant qu'elles doivent être clairement distinguées, non seulement sur le plan conceptuel, mais aussi dans toute étude concernant la vision des sciences des élèves ou des enseignants : « [...] les gens combinent souvent NOS avec les processus de la science. [...] Bien qu'il existe un chevauchement et une interaction entre les processus de la science et NOS, il est néanmoins important de distinguer les deux » (Lederman et al., 2002, p. 499) ; « la combinaison de NOS et de l'enquête scientifique a nui à la recherche sur NOS depuis le début » (Lederman, 2007, p. 835). En quoi la combinaison de NOS et SI est-elle un problème dans les recherches sur la vision des élèves et des enseignants ? Lederman et ses collègues ne le précisent pas.

Cette distinction entre NOS et SI repose sur une définition de NOS, qui la limite aux caractéristiques des connaissances scientifiques. Il convient de souligner que d'autres auteurs en didactique des sciences entendent l'expression NOS en un sens plus large qui comprend également les aspects des sciences auxquelles l'expression SI fait référence. C'est

le cas par exemple de Clough (2011, p. 56) selon qui NOS renvoie à « ce qu'est la science et comment elle marche, les hypothèses qui sous-tendent la connaissance scientifique, comment les scientifiques fonctionnent comme un groupe social et comment la société impacte et réagit à la science ». On peut trouver une définition similaire chez Hodson (2014, p. 912).

Toutefois, les travaux de Lederman et de ses collègues constituent une référence majeure dans la littérature sur NOS. De plus, la distinction qu'ils opèrent entre NOS et SI se traduit par la proposition des deux questionnaires distincts VNOS et VASI, que nous prenons comme point de départ de notre propre questionnaire. C'est pourquoi, il nous est apparu important de questionner cette distinction : est-elle pertinente du point de vue épistémologique ? La discussion qui suit est encore en construction ; elle fera possiblement l'objet d'un article.

Une première façon d'étudier la pertinence de la distinction NOS/SI consiste à évaluer son caractère opératoire. Est-il possible de dresser une liste de points d'épistémologie liée à NOS et une autre liée à SI ? Considérons les points d'épistémologie sur lesquels portent les deux questionnaires VNOS et VASI.

NOS1 : La nature empirique de la connaissance scientifique
NOS2 : La distinction entre observation, inférence et entités théoriques en science
NOS3 : La distinction entre théories scientifiques et lois
NOS4 : La créativité et l'imagination en science
NOS5 : La charge théorique dans la connaissance scientifique
NOS6 : Les liens entre la connaissance scientifique et le contexte social et culturel
NOS7 : Le mythe de la méthode scientifique
NOS8 : La nature provisoire de la connaissance scientifique

Tableau 4 – Points d'épistémologie évalués par VNOS

SI1 : Toutes les enquêtes scientifiques commencent avec une question mais ne testent pas nécessairement une hypothèse
SI2 : Il n'y a pas un ensemble unique d'étapes ni une séquence d'étapes dans toutes les investigations scientifiques
SI3 : Les procédures d'enquête sont guidées par la question posée
SI4 : Des scientifiques suivant les mêmes procédures peuvent ne pas obtenir les mêmes résultats
SI5 : Les procédures d'enquête peuvent influencer les résultats
SI6 : Les conclusions de la recherche doivent être cohérentes avec les données recueillies
SI7 : Les données (<i>data</i>) scientifiques ne sont pas identiques à des preuves (<i>evidence</i>) scientifiques
SI8 : Les explications sont développées à partir d'une combinaison de données recueillies et ce qui est déjà connu

Tableau 5 – Points d'épistémologie évalués par VASI

Si l'on compare les deux questionnaires, il apparaît que trois points d'épistémologie sont similaires. SI6 revient à dire que la construction des connaissances scientifiques doit prendre en compte les observations ou les expériences qui ont été réalisées concernant le sujet étudié. Ce point peut donc être considéré comme une instance spécifique de NOS1. À noter que Lederman et ses collègues apportent des explications très voisines concernant ces deux points : à propos de NOS1, ils écrivent que « la science est au moins partiellement basée sur l'observation du monde naturel » (2002, p. 499) ; s'agissant de SI6, ils expliquent que « la connaissance scientifique est basée sur l'empirie » (2014, p. 70). Considérons ensuite SI4, qui

affirme que « des scientifiques suivant les mêmes procédures peuvent ne pas obtenir les mêmes résultats ». Ce point, d'après Lederman et al. (2014, p. 69) peut être expliqué par le fait que « les données ne sont pas indépendantes [et] peuvent être interprétées de différentes manières » par les scientifiques, en fonction du « cadre théorique ». Ainsi, SI4 peut être vu comme une conséquence directe de NOS5 qui met en avant la « charge théorique » des données. Enfin, SI2, suivant lequel « il n'y a pas un ensemble unique d'étapes ni une séquence d'étapes dans toutes les investigations scientifiques », n'est rien d'autre qu'une explicitation en positif du « mythe de la méthode scientifique » correspondant à NOS7, que Lederman et al. (2002, p. 501) décrivent en ces termes : « la croyance qu'il existe une procédure par étapes similaire à une recette que tous les scientifiques suivent lorsqu'ils font de la science ».

De plus, deux points de VNOS, à savoir NOS4 et NOS6, peuvent être considérés comme relevant tout autant de NOS que de SI, bien qu'ils ne soient pas intégrés dans VASI. En effet, ces éléments interviennent dans le processus de production des connaissances scientifiques : la créativité (NOS4) peut intervenir par exemple dans l'élaboration d'un nouveau protocole expérimental ; tandis que le contexte socio-culturel (NO6) peut intervenir par exemple dans le financement et donc dans la sélection d'une voie de recherche donnée.

Cette analyse des points de VNOS et de VASI montre qu'il est difficile en pratique d'opérer une distinction tranchée entre les points portant sur NOS et ceux portant sur SI.

En amont de la question de l'applicabilité de cette distinction, celle-ci peut être questionnée sur le plan épistémologique. Parmi les didacticiens des sciences spécialistes de NOS, certains auteurs la remettent en cause : par exemple, Hodson (2014, p. 911) soutient qu'« une grande partie de notre connaissance scientifique et, par conséquent, la considération de son statut, de sa validité et de sa fiabilité est intimement liée à la conception, à la réalisation et au compte rendu d'enquêtes scientifiques ». Autrement dit, selon cet auteur, on ne peut comprendre les caractéristiques des connaissances scientifiques sans connaître la manière dont celles-ci ont été constituées.

Lederman et ses collègues ne se contentent pas de distinguer sur le plan conceptuel, d'un côté les caractéristiques des connaissances scientifiques déjà constituées et, de l'autre les méthodes ou les facteurs qui sont intervenus lors de l'élaboration de ces connaissances. Ils soutiennent également que cette distinction est « importante » et qu'il convient de bien séparer l'étude de la vision sur NOS et celle de la vision sur SI. Rappelons que ces auteurs entendent construire leurs deux questionnaires autour de points d'épistémologie considérés comme étant consensuels (non « controversés ») dans le champ de l'épistémologie (Lederman et al., 2002, p. 499, 2014, p. 67). Or, l'idée d'une distinction tranchée entre NOS et SI ne fait elle-même pas consensus en épistémologie. Elle est remise en cause par plusieurs courants de pensée dans le domaine de l'épistémologie : en particulier le pragmatisme, le positivisme logique et la sociologie des sciences. Suivant le pragmatisme de James (2007 [1907], p. 226), « la vérité d'une idée n'est pas une propriété stable qui lui soit inhérente » ; elle est indissociable du « processus » par lequel celle-ci est vérifiée ; en d'autres termes, le statut de vérité (provisoire ou relative) assigné à un fait scientifique ou à une théorie scientifique est indissociable du processus par lequel ceux-ci ont été construits et validés ; une telle conception pragmatiste a été développée plus récemment par des philosophes influents tels que Putnam (1995) ou Habermas (2001 [1999]). Une conception similaire a été défendue par les positivistes logiques, tels que Schlick (1932-33) ou Carnap (1931) : reprenant une idée de Wittgenstein (1961 [1921], §4.063), ils considèrent que la signification d'une proposition concernant le monde est donnée par la méthode de sa

vérification (voir aussi Jacob, 1980 ou Stöltzner & Übel, 2006); autrement dit, pour comprendre ce que nous dit un fait scientifique ou une théorie scientifique, il convient de considérer les procédures qui ont été ou qui pourraient être mises en œuvre pour les établir ou les valider. Chez plusieurs sociologues des sciences, on retrouve une idée comparable, bien qu'elle soit exprimée en d'autres termes; par exemple, Latour et Woolgar (1996 [1979], pp. 186-187) écrivent: « l'observation de l'activité du laboratoire montre que le caractère "objectif" d'un fait est lui-même la *conséquence* du travail du laboratoire » et « non sa cause ». Ou encore, dans le contexte particulier de l'interprétation de la mécanique quantique, Bohr (1963, p. 4) a mis en avant l'idée du caractère indissociable des phénomènes étudiés à l'échelle microscopique et des instruments nécessaires à leur production (Bohr parle d'« individualité »): « le compte-rendu non-ambigu des phénomènes proprement quantiques doit, en principe, inclure une description de tous les aspects pertinents du dispositif expérimental ». Ces exemples illustrent le fait qu'une diversité d'épistémologues, suivant plusieurs lignes de raisonnement et dans des termes variés, exprime l'idée que NOS et SI sont indissociables.

Or, si la distinction entre NOS et SI n'est pas tranchée, on peut imaginer que les élèves ou les enseignants aient une vision sur NOS qui soit liée, sur certains points, à leur vision sur SI. Ainsi, selon nous, séparer l'étude de la vision sur NOS de l'étude de la vision sur SI, c'est risquer de se priver de possibles éclairages mutuels entre les deux études; ou autrement dit, c'est possiblement dégager une vision des sciences des élèves ou des enseignants qui soit tronquée.

Des points d'épistémologie avec des niveaux consensuel et controversé

Laissant provisoirement de côté la question de la distinction entre NOS et SI, j'ai examiné les points d'épistémologie sur lesquels portent les questionnaires VNOS et VASI. La présentation qu'en font Lederman et ses collègues fait face, selon moi, à plusieurs objections.

Premièrement, trois points d'épistémologie (NOS1, NOS6 et NOS8) ne sont consensuels en épistémologie qu'à un premier niveau d'analyse. À un second niveau d'analyse, ils font l'objet de débats. NOS1 (la nature empirique de la connaissance scientifique) peut renvoyer à une idée consensuelle: les données de l'observation et de l'expérience interviennent dans la construction et la validation des modèles et des théories scientifiques. Une seconde idée consensuelle peut être associée à NOS1: les données empiriques disponibles ne permettent pas de valider un modèle ou une théorie de façon certaine parce qu'on peut toujours imaginer que des données empiriques nouvelles obtenues dans le futur soient en contradiction avec le modèle ou la théorie; c'est le problème de l'induction (problème identifié d'abord par Hume, 1983 [1748], concernant la causalité, puis formulé de diverses manières au XXe siècles, voir Chalmers, 1987 [1976], chap. 2 Barberousse et al., 2000, chap. II). Cependant, les épistémologues dans la deuxième partie du XXe siècle ont débattu la question de savoir s'il est raisonnable de tenir pour vrai un modèle ou une théorie sur la base des données empiriques disponibles, malgré le problème de l'induction. Certains épistémologues, réalistes scientifiques, ont répondu positivement en mettant en avant l'argument du « non-miracle » (Putnam, 1975) ou de la « non-coïncidence » (Hacking, 1983, Cartwright, 1983): si certains modèles ou théories acceptées aujourd'hui permettent de rendre compte et de prédire un très grand nombre d'expériences, suivant des protocoles expérimentaux très variés, il est raisonnable de penser que ce que nous disent ces modèles ou théories sur le monde est vrai. D'autres, au contraire, ont répondu négativement en

avançant l'argument de la « sous-détermination de la théorie par l'expérience » (voir section 4.3).

De même, NOS6 (les liens entre la connaissance scientifique et le contexte social et culturel) comporte un niveau consensuel. Par exemple, il est communément admis que le contexte socio-économique peut exercer une influence, notamment par les appels à projets financés, sur le développement de tel ou tel axe de recherche. Cependant, la question de savoir si le contenu même des connaissances scientifiques est, dans une certaine mesure, la traduction indirecte d'idées venant du domaine socio-culturel est très controversée. Par exemple, comment interpréter le fait que plusieurs scientifiques ayant contribué à l'émergence du principe de conservation de l'énergie admettaient *a priori* le principe métaphysique de l'égalité de la cause et de l'effet ou la croyance religieuse selon laquelle seul Dieu peut créer ou détruire les pouvoirs de la matière (voir section 3.3) ? Ou encore, comment interpréter la tendance culturelle en Allemagne à la sortie de la première guerre mondiale qui a conduit des scientifiques à pencher en faveur d'une physique acausale avant même l'avènement de la mécanique quantique (Forman, 1971, Selleri, 1994 [1986]) ?

Le point NOS8 (la nature provisoire de la connaissance scientifique) peut également être décomposé en un niveau consensuel et un niveau controversé. L'évolution des sciences marquée par l'abandon de certaines théories au profit de nouvelles est un fait mis en lumière par l'histoire des sciences. À la lumière de ce fait, les épistémologues admettent de façon consensuelle l'idée générale du caractère provisoire des connaissances scientifiques actuelles : ces connaissances sont susceptibles d'évoluer dans le futur. Cependant, un débat oppose les épistémologues sur la question de savoir si, malgré les changements constatés dans l'histoire des sciences et malgré les changements possibles à venir, il n'y a pas des éléments des modèles ou théories acceptées aujourd'hui qui seraient stables, c'est-à-dire non sujets au changement. Certains répondent négativement en mettant en avant l'argument de la « méta-induction pessimiste », formulé notamment par Laudan (1981) : il existe de nombreuses théories qui étaient tenues pour vrai dans le passé avant d'être finalement rejetées ; on peut induire que les théories acceptées aujourd'hui risquent de subir le même sort dans le futur. Pour d'autres, il existe des critères qui attestent l'existence de certaines entités postulées par les théories (ex : atome ou électron) par-delà les changements de théorie pour en rendre compte : par exemple, Hacking (1983) soutient que le fait de pouvoir manipuler une telle entité nous oblige à croire son existence. Pour d'autres encore, tels que Worrall (1989) ou Ladyman (1998), ce sont les « structures » que l'on retrouve dans des théories successives sous diverses expressions mathématiques, qui sont de bonnes candidates pour être des connaissances stables et donc pouvant légitimement être tenues pour vraies.

Pour ces différents points d'épistémologie qui sont évalués *via* les questionnaires soumis aux élèves ou aux enseignants, il semble important de bien clarifier de quel niveau il est question. Une telle clarification n'est possible que si l'existence du niveau controversé est reconnue, ce qui est passé sous silence dans les articles de Lederman et al. (2002, 2014).

Des points d'épistémologie discutables

Deuxièmement, quatre points d'épistémologie (NOS3, NOS4, NOS5 et SI7) tels qu'ils sont présentés par Lederman et ses collègues me semblent discutables. Le premier est la distinction entre théorie scientifique et lois (NOS3), qui est basée sur la définition des lois comme « des énoncés descriptifs de relations entre des phénomènes observables » (Lederman et al., 2002, p. 500). Cette définition convient pour les *lois phénoménologiques*, comme la loi de Boyle mentionnée par Lederman et al. : cette loi exprime une relation

spécifique entre la pression et le volume d'un gaz (à température constante) ; elle a été inférée à partir de l'observation de régularités dans les phénomènes. Cependant, cette définition ne convient pas pour des *lois théoriques* (concernant la différence entre les deux types de lois, voir Cartwright, 1983), c'est-à-dire des lois avec une portée plus large, qui sont le résultat d'un raisonnement plus théorique et qui sont plus indirectement reliées à l'expérience. On peut mentionner, par exemple, les lois de Newton et l'équation de Schrödinger. De telles lois peuvent constituer le cœur d'une théorie. Pour de telles lois, il apparaît plus difficile de faire une distinction claire entre lois et théories.

La manière dont Lederman et al. (2002, p. 500) présentent la créativité (NOS4) est également discutable : ils la mettent en opposition avec la « rationalité », sans préciser en quoi il y a opposition. Certes la créativité dans les arts et la rationalité en sciences semblent s'opposer à plusieurs égards. Mais la créativité en sciences est-elle la même que la créativité dans les arts ? Cela mériterait un examen approfondi. À défaut d'effectuer un tel examen, on peut apporter un exemple où créativité et rationalité en sciences vont de pairs : le raisonnement par analogie (Hofstadter & Sander, 2013). En effet, faire une analogie pour développer une nouvelle loi ou un nouveau modèle peut être considéré comme rationnel, puisque cela consiste à s'appuyer sur des connaissances bien établies qui nous sont familières.

En outre, la formulation de NOS5 apparaît discutable : d'après Lederman et al. (2002, p. 501), « la connaissance scientifique est chargée de théorie ». Si l'on considère un modèle ou une théorie acceptée comme fournissant une connaissance scientifique, cette formulation apparaît circulaire. Dans le domaine de l'épistémologie, on dit habituellement que ce sont *les données de l'observation ou de l'expérience* (ou encore *les énoncés sur les données de l'observation ou de l'expérience*) qui sont « chargées de théories » (voir section 4.3).

Enfin, l'explication apportée au point SI7, selon lequel il existe une différence entre les « données scientifiques » (« scientific data ») et les « preuves scientifiques » (« scientific evidence »), me semble aussi discutable. Ces deux notions sont distinguées de la manière suivante : « Les données sont des observations recueillies par des scientifiques au cours de l'investigation et elles peuvent prendre diverses formes (par ex : nombres, descriptions, photos, audio, échantillons physiques, etc.). Une preuve, par contraste, est un produit des procédures d'analyse des données et d'une interprétation subséquente » (Lederman et al., 2014, p. 70). Pour illustrer leur propos, ils donnent l'exemple suivant : « les observations de l'orbite de Mars autour du Soleil » sont des « données » lorsqu'elles sont considérées seules et une « preuve » lorsqu'elles sont considérées dans l'optique de valider ou invalider une théorie (comme la théorie de la relativité générale). Or, dans cet exemple, les données et la preuve correspondent au même objet, à savoir des observations de l'orbite de Mars autour du Soleil ; la différence réside dans la fonction qui est assignée à ces observations : absence de fonction dans le cas des « données », fonction de support pour valider ou invalider une théorie dans le cas de la « preuve ». Cette idée d'une simple différence de fonction est mise en avant par d'autres auteurs qui traitent de la question de la preuve (Aikenhead, 2005, Macagno, 2016). Ainsi, contrairement à la définition proposée par Lederman et al., la preuve ne correspond pas à des données investies d'une interprétation supplémentaire. Parler d'une telle charge interprétative peut générer une confusion avec l'idée de « charge théorique » et laisser penser à tort que les données, elles, ne seraient pas chargées de théorie.

Le choix des points d'épistémologie à traiter en classe

Une troisième objection concerne le choix des points d'épistémologie de VNOS et VASI. Ces points sont ceux que Lederman et ses collègues (2002, p. 499, 2014, pp. 67-68) estiment être « accessibles » aux élèves et « pertinents pour leur vie quotidienne ». Plusieurs points semblent effectivement pertinents à comprendre par les élèves pour développer leur vision des sciences. Je propose de les reformuler en faisant ressortir les idées consensuelles (les acronymes « VOS1 », « VOS2 »... étant utiles pour la suite de la discussion) :

- VOS1 : La construction et la validation des connaissances scientifiques s'appuient sur l'expérience, sans que celle-ci permette une validation certaine ;
- VOS2 : Il n'existe par une méthode scientifique unique avec une séquence prédéterminée d'étapes ;
- VOS3 : Les investigations scientifiques sont motivées et guidées par des questions et des problèmes ;
- VOS4 : Les connaissances scientifiques actuelles sont susceptibles d'évoluer dans le futur ;
- VOS5 : Le contexte socio-économique et culturel a une influence sur le développement des sciences (la question du degré et de la nature de cette influence étant laissée ouverte) ;
- VOS6 : Les données empiriques sur lesquelles se basent les connaissances scientifiques sont chargées de théorie.

En revanche, on peut émettre des réserves sur le choix d'autres points. En particulier, avec Hodson (2014, p. 921), on peut se demander quel est l'intérêt pour les élèves de savoir distinguer loi et théorie (NOS3) (laissant de côté le fait que cette différence est discutable, voir ci-dessus). Il en va de même de la créativité (NOS4) : qu'apporte aux élèves l'idée que la créativité intervient en sciences, si la forme de cette créativité n'est pas précisée ou discutée (par exemple, en la comparant avec la créativité dans les arts) ? On peut également s'interroger sur la pertinence de faire comprendre aux élèves le point S15 selon lequel « les procédures d'enquête peuvent influencer les résultats » : il s'agit d'un point subtil de l'épistémologie contemporaine (mis en lumière dans les recherches du tournant pratique, voir section 4.3) auquel il est peu probable que les élèves soient confrontés lors de leurs propres expérimentations en classe.

À l'inverse, trois points d'épistémologie absents de VNOS et de VASI, ou qui ne sont pas explicitement mis avant dans les articles de Lederman et al. (2002, 2014), me semblent pertinents à intégrer. Un premier point concerne les modèles : il apparaît important que les différents modèles étudiés en classe (ex : modèle atomiste et modèle héliocentrique) soient reconnus par les élèves comme tels, c'est-à-dire qu'ils ne soient pas considérés de façon transparente ou comme une simple copie de la réalité empirique observée (ce qui est une tendance chez les élèves, Harrison & Treagust, 2000), mais bien identifiés comme des constructions intellectuelles distinctes de la réalité empirique dont ils cherchent à rendre compte. Prendre conscience de ce point apparaît une condition nécessaire pour envisager qu'un modèle puisse être remis en cause par l'expérience, affiné, modifié ou remplacé par de nouveaux modèles, autrement dit, pour développer une compréhension d'ordre épistémologique concernant les modèles en sciences (Gilbert, 2004). Ce point peut être rapproché du NOS2 où il est question de la distinction entre « observations » et « inférences ». À noter que Lederman et al. (2002) ne parlent pas explicitement de

« modèle » lorsqu'ils présentent ce point, mais font de « la nature inférentielle des modèles atomistes » un item étudié de leur questionnaire.

Un second point absent de VNOS et VASI, qui semble intéressant à aborder avec les élèves, concerne le rôle constructif que jouent les erreurs, ou autrement dit les modèles ou théories considérées après-coup comme erronés, dans le développement des sciences. Ce point a été développé par Bachelard, pour qui les connaissances ne sont pas cumulatives, mais sont en permanence révisées, et ce, dans une dynamique d'identification d'erreurs dans les connaissances préalables et de « rectification » de ces erreurs (1999 [1934], p. 178, 2004 [1938], pp. 13 et 285). Sans parler d'« erreur », Kuhn (1983 [1970]) a également mis en avant le rôle déterminant des anciennes théories qui ont été écartées dans l'histoire des sciences : dans de nombreux cas, les nouvelles théories (ex : la mécanique quantique) ont été développées face à des « anomalies » (ex : le spectre des corps noirs) qui n'ont pu être identifiées que dans le cadre de ces anciennes théories.

Enfin, un troisième point d'épistémologie absent de VNOS et VASI, qui pourrait faire sens pour les élèves, concerne le rôle des interactions entre les scientifiques. Sans considérer ici les processus très complexes d'interactions sociales entre scientifiques qui sont étudiés par les sociologues des sciences (voir par exemple Pestre, 2006), ce point pourrait être formulé ainsi : les scientifiques construisent et valident collectivement les connaissances scientifiques en collaborant et en soumettant leurs résultats à la critique de leurs pairs.

Ces trois nouveaux points d'épistémologie peuvent être synthétisés ainsi :

- VOS7 : Les modèles sont des constructions intellectuelles distinctes de la réalité empirique dont ils cherchent à rendre compte ;
- VOS8 : Certains modèles ou théories aujourd'hui jugés erronés ont contribué au développement des sciences ;
- VOS9 : Les scientifiques construisent et valident collectivement les connaissances scientifiques.

Deux enjeux éducatifs complémentaires

Pour les points d'épistémologie consensuels VOS1 à VOS9, l'enjeu éducatif serait que les élèves parviennent à les comprendre afin de développer leur vision des sciences. Cependant, ces points ne sont pas équivalents à des connaissances scientifiques. Il n'est pas question pour les enseignants de les transmettre, ni pour les élèves de les apprendre. Ces points sont de nature philosophique. Leur compréhension requiert donc une réflexion sur les sciences ou, autrement dit, un regard critique porté sur elles. À l'appui de cette idée, plusieurs études montrent que seules les approches explicites de NOS, qui consistent à discuter certains aspects des sciences pour susciter la réflexion, se révèlent être fécondes pour développer la vision des sciences des élèves (comme indiqué plus haut, section 4.5).

Une distinction semble devoir être opérée ici : celle entre, d'une part les points d'épistémologie qui sont à comprendre par les élèves, et d'autre part les questions épistémologiques génératrices de discussions riches, susceptibles d'initier la réflexion des élèves et les conduire à comprendre ces points. Des exemples de telles questions, discutées à partir de cas concrets, pourraient être : une expérience permet-elle de vérifier un modèle ou une théorie ? Les modèles ou les théories acceptées aujourd'hui représentent-elles le monde ? De quelle manière le contexte socio-économique et culturel influence-t-il les sciences ? Certes, les points d'épistémologie VOS1 à VOS9 apportent des éléments de réponse consensuels à de telles questions. Cependant, ces dernières suscitent aussi la confrontation d'idées controversées, comme celles évoquées plus haut concernant les

points NOS1, NOS6 et NOS8. Par conséquent, le chemin conduisant les élèves vers la compréhension des points d'épistémologie consensuels passe aussi par la rencontre, la discussion, voire l'adoption d'idées controversées. Suivant la perspective de Matthews (voir section 4.5), ce cheminement réflexif favorisant chez l'élève l'adoption d'une posture critique sur les sciences constitue en soi un enjeu éducatif. Finalement, les deux enjeux éducatifs peuvent se voir de manière complémentaire : le développement chez l'élève d'une posture critique (l'enjeu éducatif de NOS selon la perspective de Matthews) constitue une condition nécessaire pour lui permettre de comprendre certains points d'épistémologie (l'enjeu éducatif de NOS selon la perspective de Lederman et Abd-El-Khalick).

Évaluation de positions sur des controverses épistémologiques

Afin de comprendre la manière dont un enseignant mène une discussion avec ses élèves sur des questions épistémologiques controversées, il peut être intéressant de connaître la position de l'enseignant à propos de ces idées controversées. Deux controverses opposent fortement les épistémologues et peuvent être directement mises en lien avec les points d'épistémologie présentés ci-dessus. La première concerne le rôle des modèles et oppose schématiquement deux positions : les modèles visent à décrire le monde (position réaliste) *versus* les modèles scientifiques visent à expliquer et à prévoir des phénomènes observables (position anti-réaliste ou instrumentaliste). La seconde controverse concerne l'influence du contexte socio-économique et culturel sur la construction des connaissances scientifiques : ce contexte exerce *ou non* une influence sur les hypothèses des scientifiques et leur interprétation des résultats (relativisme fort *ou rejet* d'un relativisme fort). Pour la suite, ces deux controverses épistémologiques seront identifiées ainsi :

- VOS10 : Réalisme *versus* instrumentalisme concernant le rôle des modèles ;
- VOS11 : Adoption *ou rejet* d'un relativisme fort concernant l'influence du contexte socio-économique et culturel sur la construction des connaissances scientifiques.

Étude empirique de questions méthodologiques au moyen du questionnaire VOS

À partir de cette analyse critique des questionnaires VNOS et VASI, nous avons élaboré notre propre questionnaire, appelé « VOS ». Celui-ci a été conçu, dans le cadre du projet FORMSCIENCES, pour évaluer la vision des sciences des enseignants avec la perspective ensuite de mettre en regard leur vision des sciences avec leurs pratiques d'enseignement des sciences et d'observer leurs évolutions respectives. Avec David Cross et Valérie Munier, nous avons analysé et discuté les réponses de 160 enseignants de l'école primaire afin d'explorer trois questions de recherche portant sur la méthodologie d'évaluation de la vision des sciences des enseignants (recherche faisant l'objet d'un article en préparation). La première consiste à questionner sur le plan méthodologique la distinction de Lederman et de ses collègues entre NOS et SI : (1) Est-il pertinent de dissocier l'étude de la vision des enseignants sur NOS de l'étude de leur vision sur SI ? La deuxième question concerne le choix de Lederman et de ses collègues de faire porter leurs questionnaires uniquement sur des points d'épistémologie consensuels : (2) Est-il pertinent de dissocier l'étude de la vision des enseignants sur NOS ou SI de l'étude sur leur position concernant des controverses épistémologiques ? La troisième question est liée à la manière de catégoriser la vision des sciences des enseignants : nous avons pointé plus haut qu'il était discutable de catégoriser la vision des sciences des enseignants suivant des catégories *a priori* identifiées dans la littérature en philosophie des sciences ; toutefois : (3) Si l'on s'appuie sur l'évaluation du niveau d'expertise des enseignants sur un ensemble de points d'épistémologie, peut-on

classer leur vision des sciences sur une échelle globale d'expertise ? Cette étude est présentée dans un article soumis à la revue *Research in Science Education*.

Présentons d'abord le questionnaire VOS. Celui-ci a été élaboré et discuté lors de nombreuses réunions rassemblant 5 chercheurs³. Nous avons retenu les 9 points d'épistémologie consensuels VOS1 à VOS9 et les deux controverses épistémologiques VOS10 et VOS11. Le questionnaire comporte 9 questions, avec parfois des sous-questions. Certaines questions visent à fournir des informations concernant plusieurs points d'épistémologie. À l'inverse, certains points d'épistémologie peuvent être évalués à partir des réponses à différentes questions. La grille de codage assez complexe (non présentée ici pour des questions de place) a fait l'objet de nombreux ajustements. Certaines questions sont ouvertes, d'autres fermées (à choix multiples). Certaines questions sont formulées en lien avec un cas concret, d'autres de façon plus abstraite. Voyons deux exemples de questions : Q2 et Q9A. La question Q2 est ouverte, concerne le modèle atomiste et vise à fournir des informations concernant VOS1, VOS4 et VOS7 :

Q2. Une description de la matière comme étant constituée d'atomes avait été proposée par certains philosophes de la Grèce antique. Elle a ensuite été abandonnée pendant plusieurs siècles. Une description en termes d'atomes a finalement été adoptée par les scientifiques au début du XX^{ème} siècle. Quelles sont les raisons possibles, selon vous, qui peuvent expliquer que cette description ait été acceptée au début du XX^{ème} siècle ?

La question Q9A est fermée, concerne les modèles géocentrique et héliocentrique et vise à fournir des informations concernant VOS4, VOS7 et VOS10 :

Q9A Dans l'antiquité, les grecs pensaient que le Soleil tournait autour de la Terre (description géocentrique). On considère aujourd'hui que c'est la Terre qui tourne autour du Soleil (description héliocentrique). Avec laquelle des affirmations suivantes êtes-vous le plus en accord (un seul choix possible) :

- Les descriptions géocentrique et héliocentrique sont toutes deux des modèles qui visent à décrire le monde, mais le modèle héliocentrique est plus proche de la réalité.
- Les descriptions géocentrique et héliocentrique sont toutes deux des modèles qui permettent d'expliquer et de prévoir des phénomènes observables, mais le modèle héliocentrique permet d'expliquer et de prévoir davantage de phénomènes observables.
- La description géocentrique n'est qu'un modèle alors que la description héliocentrique est conforme à la réalité.
- Aucune, expliquez pourquoi :

Dans la dernière phase de son élaboration, le questionnaire a été soumis à 3 enseignantes expérimentées de l'école primaire et discuté avec elles pendant environ 1h. Il a également été soumis à 24 étudiants, enseignants stagiaires en master M2, et discuté collectivement avec eux pendant une séance de 2h. Ces discussions ont permis de tester si les questions formulées étaient compréhensibles et sans ambiguïté, ce qui a conduit à quelques ajustements. Le questionnaire a ensuite été soumis à 10 chercheurs avec une expertise dans le champ de l'épistémologie. Pour chacun des points d'épistémologie consensuels, au moins 8/10 de ces chercheurs ont été codés comme « experts » ou « plutôt experts », apportant ainsi une validation au questionnaire.

Pour notre étude, nous avons analysé les réponses de 160 enseignants de l'école primaire (enseignants tests ou témoins du projet FORMSCIENCES, mais avant le début de la formation et donc indépendamment de la formation). Pour assurer la fiabilité du codage des questions ouvertes, les réponses des enseignants ont toutes été codées simultanément par deux ou

³ David Cross, Luz Martinez, Karine Molvinger, Valérie Munier et moi-même

par trois chercheurs. Dans le cas d'un désaccord ou si les réponses étaient considérées comme ambiguës, le codage a été discuté jusqu'à obtention d'un accord.

Après codage des réponses des 160 enseignants, nous avons obtenu les résultats figurant dans le tableau 6.

	VOS1	VOS2	VOS3	VOS4	VOS5	VOS6	VOS7	VOS8	VOS9
Novice	25	10	9	14	0	42	51	5	1
Plutôt novice	55	32	<i>na</i>	32	0	<i>na</i>	<i>na</i>	41	36
Plutôt expert	5	38	<i>na</i>	20	47	<i>na</i>	39	1	18
Expert	0	20	91	2	53	58	1	50	2
Dépendant du contexte	8	<i>na</i>	<i>na</i>	11	<i>na</i>	<i>na</i>	5	<i>na</i>	25
Abs. de réponse	1	1	0	21	0	0	5	3	19
Non interprétable	6	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>	0	0

na = non applicable

	VOS10
Réaliste naïf	51
Réaliste nuancé	15
Instrumentaliste	28
Abs. de réponse	6

	VOS11
Relativiste fort	8
Relativiste plutôt fort	49
Relativiste plutôt modéré	14
Relativiste modéré	20
Rejet du relativisme	0
Abs. de réponse	8

Tableau 6 – Distribution de la vision des 160 enseignants sur les différents points d'épistémologie de VOS en termes de pourcentages

Les items VOS4, 7 et 10 ont été construits à partir de la même question (conjointement avec d'autres questions) ; de plus, ces trois items concernent les modèles en sciences (leur caractère évolutif, leur construction et leur rôle) ; par conséquent, afin d'éviter toute circularité, nous avons procédé à une forme de réduction de ces trois items en les rassemblant en un item unique, appelé « item Modèle ». Une analyse MCA des réponses des enseignants montre que leur vision sur ce point peut être classée suivant 4 catégories allant de la moins experte (« Modèle 1 ») à la plus experte (« Modèle 4 »).

Afin d'explorer les questions de recherche formulées ci-dessus, nous avons réalisé deux types d'analyse statistique des données : Implicative Statistical Analysis (ISA) et Multiple Correspondence Analysis (MCA). Ces deux types d'analyse permettent d'étudier les liens entre la vision des enseignants sur différents points d'épistémologie et potentiellement de dégager des profils épistémologiques. Pour simplifier le propos dans ce qui suit, je parlerai de l'« item VOS1 » pour parler de la vision des enseignants sur le point VOS1 (de même pour les autres points).

Les résultats des analyses ISA et MCA sont présentés dans les figures suivantes :

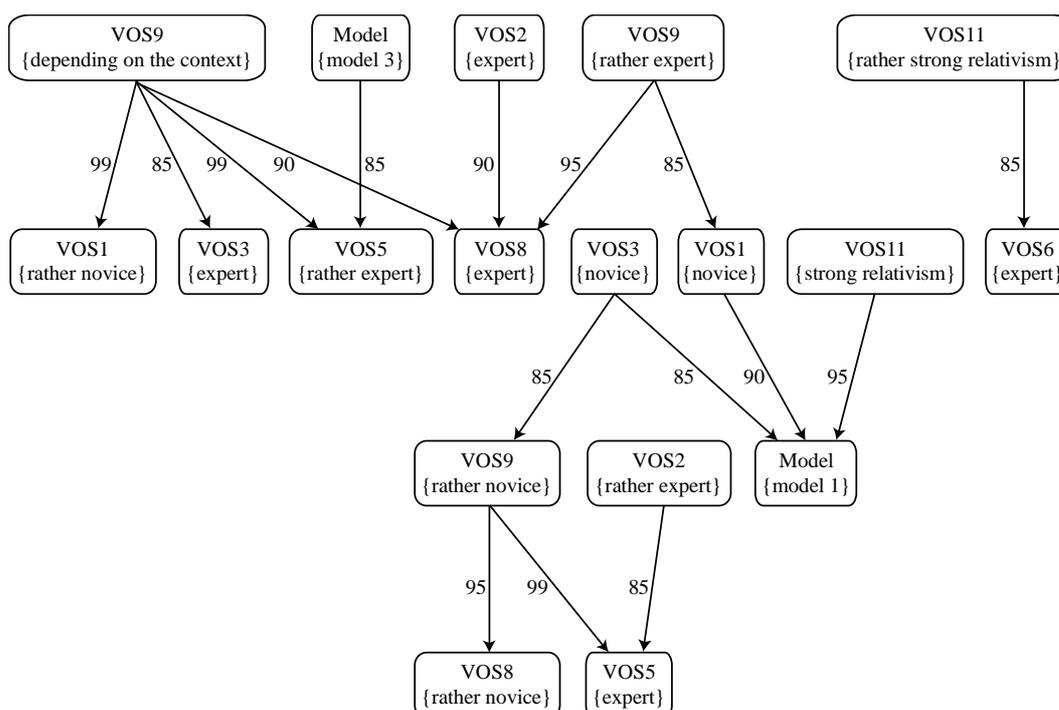


Figure 3 – Analyse ISA des relations d'implication entre les items de VOS
Le nombre associé à chaque flèche indique le degré de l'implication (100 correspondant à une implication stricte au sens mathématique)



Figure 4 – Analyse MCA (avec HCPC) de la structure des liens entre les items de VOS

Ces analyses apportent plusieurs éléments de réponses aux questions de recherche 1 à 3. Considérons-les successivement.

(1) Est-il pertinent de dissocier l'étude de la vision des enseignants sur NOS de l'étude de leur vision sur SI ? Pour tenter de répondre à cette question, nous mettons entre parenthèses la discussion épistémologique précédente sur la distinction entre NOS et SI et supposons que chacun des points d'épistémologie relève soit de NOS soit de SI. Nous considérerons ainsi que les points VOS1, 4, 6, 7, 10, et donc Modèle, sont des items NOS, tandis que les points VOS2, 3, 5, 8, 9 et 11 sont des items SI. Nous pouvons alors regarder si

empiriquement les items NOS sont indépendants des items SI. L'analyse ISA de la figure 3 tend à montrer que ce n'est pas le cas ; des relations apparaissent entre des items NOS et des items SI : entre Modèle et VOS3, entre Modèle et VOS 5, entre VOS 1 et VOS9, et entre VOS6 et VOS11. Ces données empiriques remettent donc en cause le choix méthodologique de dissocier l'étude de la vision des enseignants sur NOS de celle de leur vision sur SI. Ce que disent les enseignants sur NOS peut potentiellement nous éclairer pour comprendre ce qu'ils disent sur SI et réciproquement.

(2) Est-il pertinent de dissocier l'étude de la vision des enseignants sur NOS ou SI de l'étude sur leur position concernant des controverses épistémologiques ? Là aussi, l'analyse ISA suggère que ce n'est pas le cas. L'item VOS6 (qui concerne la charge théorique) et l'item VOS11 (qui concerne le relativisme) sont liés statistiquement. Or, VOS6 correspond à un point d'épistémologie consensuel, tandis que VOS11 à une controverse épistémologique. En l'occurrence, on apprend que les enseignants qui sont fortement relativistes à propos de l'influence du contexte socio-économique et culturel sur les sciences ont de grandes chances d'être experts concernant l'idée de la charge théorique des données. Ce résultat montre que la connaissance de la position des enseignants sur des controverses scientifiques peut potentiellement apporter un éclairage sur leur vision à propos de points consensuels.

(3) Si l'on s'appuie sur l'évaluation du niveau d'expertise des enseignants sur un ensemble de points d'épistémologie, peut-on classer leur vision des sciences sur une échelle globale d'expertise ? Certains résultats de l'analyse ISA pourraient suggérer qu'une telle caractérisation est pertinente. Par exemple, les enseignants *plutôt experts* concernant Modèle ont de fortes chances d'être *plutôt experts* concernant VOS5. À l'inverse, les enseignants *novices* concernant VOS3 ont de fortes chances d'être *novices* concernant Modèle. Cependant, les résultats montrent que les enseignants peuvent être *experts* concernant un point d'épistémologie et être *novices* concernant un autre point : par exemple, *plutôt experts* concernant VOS9 et *novices* concernant VOS1 ; ou *plutôt novices* concernant VOS9 et *experts* concernant VOS5. À noter que ces deux derniers points portent sur deux dimensions sociales du développement des sciences ; l'implication statistique ainsi constatée n'est *a priori* pas prédictible du point de vue de la philosophie des sciences. L'analyse MCA de la figure 4 confirme la réponse négative apportée par l'analyse ISA à la question 3. Les réponses des enseignants ne permettent pas de les assembler en des groupes novices ou des groupes experts sur un ensemble de points d'épistémologie. Les groupes qui ressortent sont caractérisés par un mélange de réponses (plutôt) novices sur certains points et (plutôt) experts sur d'autres points.

Comment interpréter ce dernier résultat ? Du point de vue de l'épistémologie, il est difficile de dégager une cohérence dans la vision des sciences des enseignants de l'école primaire que nous avons étudiés, ce qui va dans le sens de précédentes études (Guerra, 2012, p. 68). Pour autant, cela ne signifie pas que les réponses de ces enseignants ne sont pas cohérentes. La cohérence est peut-être à chercher ailleurs. Comme indiqué plus haut, les enseignants sont des professionnels (Nott & Wellington, 1996), non pas dans le domaine de l'épistémologie, mais dans celui de l'enseignement. La cohérence de leurs réponses serait donc à chercher au niveau de leur vision des sciences, non pas considérée de façon isolée, mais en association avec d'autres connaissances, comme les connaissances disciplinaires (SMK) ou les connaissances didactiques (PCK) (Shulman, 1986), et avec leurs pratiques d'enseignement. Un autre résultat de notre étude conforte cette piste d'interprétation : la vision des sciences des enseignants sur certains points est parfois dépendante du contexte considéré ; elle est parfois différente selon qu'il s'agit du modèle atomiste ou des modèles

géo- et héliocentriques (voir tableau 6). On peut ainsi penser que la vision des sciences des enseignants se construit en partie dans leurs pratiques d'enseignement des sciences. Plusieurs études vont dans ce sens (Tsai, 2002, Waters-Adams, 2006, Guerra et al., 2010).

L'ensemble de ces résultats plaident en faveur d'une approche *semi-empirique* pour caractériser la vision des sciences des enseignants : une approche qui, d'un côté, distingue *a priori* un ensemble de points d'épistémologie (portant sur NOS et SI) et qui, de l'autre, laisse émerger empiriquement des relations entre la vision des enseignants sur divers points d'épistémologie.

4.8 Projet de recherche sur les liens entre vision des sciences et pratiques d'enseignement

Dans ce qui précède, il a d'abord été question de l'IBSE (sections 4.1 à 4.4), puis de la vision des sciences des enseignants (sections 4.5 à 4.7). Dans cette dernière section, ces deux objets d'étude sont considérés conjointement. Je vais présenter les contours d'une étude que nous avons amorcée, avec Valérie Munier et David Cross, concernant les liens entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques d'enseignement des sciences ou, le cas échéant, leurs pratiques de l'IBSE.

Au point de départ de cette nouvelle étude, nous nous sommes interrogés à propos de l'hypothèse qui se trouve au cœur des formations des Maisons pour la science (voir section 4.6) : développer la vision des sciences des enseignants (par une mise en contact avec des scientifiques) permet de « faire évoluer durablement les pratiques d'enseignement des sciences à l'école primaire ». Cette hypothèse revient à dire qu'une vision des sciences plus riche et plus critique devrait se traduire par des pratiques d'enseignement des sciences plus fécondes, c'est-à-dire qui impactent positivement les élèves en termes d'apprentissage de connaissances et/ou de méthodes scientifiques et/ou en termes de vision des sciences.

Concernant l'impact sur la vision des sciences des élèves, plusieurs études mentionnées plus haut (section 4.5) apportent un résultat nuancé : le fait que les enseignants aient une vision des sciences plus experte n'implique pas qu'ils intègrent dans leur enseignement une discussion sur des points d'épistémologie susceptible de développer la vision des sciences des élèves (Lederman, 1999, Bell et al., 2000).

Pour autant, la question se pose de savoir si la vision des sciences des enseignants influence leurs pratiques d'enseignement des sciences. Le terrain de FORMSCIENCES apparaît propice pour étudier cette question au niveau de l'approche qualitative. Pour plusieurs raisons, il n'a pas été possible de suivre comme prévu les 8 enseignants sur l'ensemble du processus pendant les 4 années du projet. L'un de nos objectifs était, pour chaque enseignant, de filmer une séquence de sciences sur un même thème avant et après la formation et de réaliser un entretien après la dernière séquence filmée. Le changement des programmes scolaires au cours du projet a été un obstacle. Nous avons pu le réaliser uniquement avec 3 enseignants. De plus, pour ces 3 enseignants, en première analyse peu de choses a évolué, que ce soit en termes de vision des sciences et de connaissances déclarées ou de pratiques d'enseignement observées. En revanche, les données recueillies avec chacun de ces 3 enseignants après formation (une séquence complète filmée, un entretien portant notamment sur des éléments de leurs pratiques et leurs réponses au questionnaire VOS) peuvent constituer le support pour une étude qualitative sur les liens entre leur vision des sciences et leurs pratiques d'enseignement des sciences.

Dans le cadre de cette étude, nous nous appuyons sur trois hypothèses de travail qui conditionnent l'approche sur le plan méthodologique :

- La vision des sciences des enseignants, considérée en soi (en particulier indépendamment de leurs pratiques d'enseignement), n'a pas nécessairement une cohérence globale ; suivant cette hypothèse, il convient de considérer leur vision sur un ensemble de points d'épistémologie (comme ceux étudiés dans VOS) ;
- Les liens entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques d'enseignement des sciences sont possiblement *dialectiques* (Tsai, 2002, Waters-Adams, 2006, Guerra et al., 2010) ; suivant cette hypothèse, des influences allant dans les deux sens peuvent être à chercher ;
- Pour chaque enseignant, sa vision des sciences et ses pratiques d'enseignement interagissent dans un *système complexe* ; celui-ci inclut aussi d'autres types de connaissances (disciplinaires, didactiques...) ainsi que des caractéristiques personnelles (formation, expérience d'enseignement passée...) et s'ancre dans un contexte défini par de multiples éléments (le niveau et les caractéristiques socio-culturelles des élèves, les contraintes matérielles de la classe, les attentes institutionnelles...) ; suivant cette hypothèse, la compréhension des liens entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques requiert possiblement la prise en compte de ses multiples autres facteurs ou déterminants.

La dernière hypothèse est assez ouverte et mérite d'être précisée en utilisant ou en développant un certain modèle des « connaissances » au sens large (incluant la vision des sciences, les connaissances disciplinaires et didactiques) et des pratiques des enseignants en sciences. Pour ce faire, nous avons commencé à étudier et discuter certains modèles proposés dans la littérature. Dans un ouvrage dirigé par Jean-Marie Boilevin, Bernard Calmettes et moi-même (Bächtold, Boilevin & Calmettes, 2017), les hypothèses et méthodologies de plusieurs modèles utilisés dans le cadre de recherches en didactique ont été exposés par leurs partisans et confrontés dans une discussion collective structurée par une série de questions telles que : « Quels sont les déterminants de l'activité enseignante, quelles sont leurs importances respectives et comment interfèrent-ils les uns avec les autres ? De quelle manière un déterminant peut-il façonner l'activité enseignante, avoir de l'influence sur elle ? Joue-t-il le rôle de cause, de raison ou de justification ? Y a-t-il une "logique" qui sous-tend les actions des enseignants ? » (ces questions étant issues d'un article proposant une comparaison des modèles, Bächtold, 2017b). Cette discussion constitue une base de réflexion pour développer un modèle qui soit adapté pour notre étude. L'un des nœuds de cette réflexion porte sur le statut des connaissances des enseignants que nous étudions par le biais de différentes méthodes (questionnaires, entretiens, vidéos de classe) : en particulier, se posent la question de la différence et des liens éventuels entre les connaissances *déclarées* et les connaissances *en action* inférées à partir des pratiques, et la question des modalités d'investigation de ces connaissances en action.

Sur le plan méthodologique, nous avons également amorcé l'élaboration d'une grille d'analyse d'aspects des pratiques d'enseignement qui font directement écho à des points d'épistémologie. Pour l'instant, à titre exploratoire, nous avons identifié un ensemble d'indicateurs pour deux points d'épistémologie (VOS1 et VOS7) et les avons appliqués pour analyser deux séquences filmées dans le cadre du projet FORMSCIENCES avant formation. Pour ces deux points, nous nous sommes attachés à la fois au discours explicite de l'enseignant et à ce qui est véhiculé implicitement par ses pratiques. Pour le premier point (VOS1) qui concerne le rôle de l'expérience, les indicateurs retenus sont :

- Occurrence et type d'activités expérimentales ou d'observations ;
- Occurrence des termes « expérience », « observer », « mesure » (ou d'autres termes du même champ sémantique) ;
- Rôle attribué à l'expérience ;
- Discours méta sur le rôle de l'expérience.

Pour le second point (VOS7) qui concerne la distinction modèle/réalité empirique, les indicateurs proposés sont :

- Occurrence et type d'activités de construction/manipulation de modèles ;
- Occurrence des termes « modèle », « analogie », « représente », « correspond à » (ou d'autres termes du même champ sémantique) ;
- Mise en correspondance explicite entre des éléments du modèle et de la réalité empirique étudiée *ou* discours assimilant modèle et réalité empirique ;
- Discours méta sur les modèles (fonctions, propriétés...).

Ces indicateurs appellent à être affinés et développés de manière systématique pour l'ensemble des points de VOS.

Ce projet est à son commencement. Les questions de recherche, les hypothèses et la méthodologie sont encore à préciser.

5. Argumenter sur des questions socio-scientifiques

5.1 Le contexte du projet AREN

Dans cette partie, je vais présenter une recherche qui a pour thème l'argumentation sur des questions socio-scientifiques. Celle-ci a été initiée en 2016 à partir de la sollicitation d'une collègue, Véronique Pinet, enseignante de philosophie en lycée (avec qui j'ai travaillé pendant plusieurs années dans un groupe IREM) avec pour objectif d'expérimenter dans des classes une plateforme numérique de débat, appelée « Dialoguea », créée par Véronique Pinet, Jean Sallantin (chercheur en intelligence artificielle), Claire Ollagnon (conceptrice de designs d'interface) et Philippe Estival (développeur en informatique). Un projet de recherche, appelé « AREN » (ARgumentation Et Numérique), a été monté autour d'une équipe plurielle rassemblant deux laboratoires de l'Université de Montpellier (LIRDEF et LIRMM), l'Académie de Montpellier, trois sociétés de développement informatique (CartoDébat, Intactile Design et Mezoa) et deux associations spécialisées respectivement dans l'organisation de débats publics et l'analyse de controverses (socio-)scientifiques (Forum des débats et ControverSciences) (voir figure 5). Ce projet bénéficie d'un financement e-FRAN (Espaces de Formation, de Recherche et d'Animation Numériques) du Programme d'Investissement d'Avenir opéré par la Caisse des Dépôts, sur la période 2016-2020. Porteur de ce projet, en duo avec Mathieu Lafourcade (LIRMM), je suis également responsable de son volet didactique.

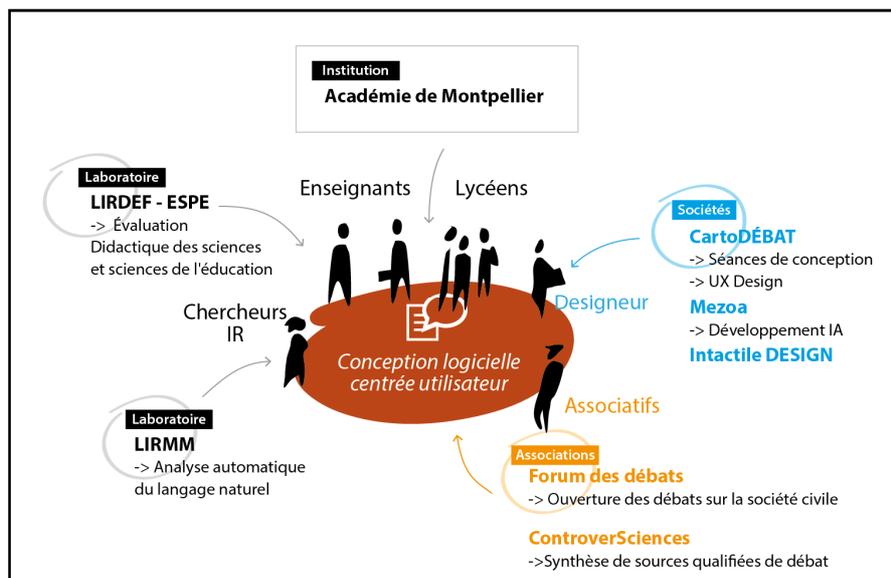


Figure 5 – Partenaires du projet AREN

Le projet AREN vise à élaborer une plateforme numérique de débat écrit en ligne (inspiré de Dialoguea et renommée « AREN ») qui favorise le développement des compétences argumentatives des élèves et de leur esprit critique dans une perspective d'éducation à la citoyenneté. Il comporte deux volets de recherche : le premier, dans le domaine didactique, consiste à expérimenter la plateforme dans les classes afin d'évaluer son impact et d'en proposer des évolutions ; le second, dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), porte sur le traitement automatique du langage naturel (TALN) et, en particulier, sur l'identification d'énoncés avec des thématiques similaires ou des argumentaires identiques ou opposés. L'ensemble du projet est mené de façon collaborative et itérative, avec 4

boucles d'itération (1 boucle par année). Chaque boucle est structurée par les étapes suivantes :

- Formation d'enseignants et co-conception d'un dispositif didactique intégrant la plateforme AREN ;
- Sélection de textes à débattre sur des questions socio-scientifiques ;
- Expérimentations dans 10 à 11 classes de lycée de différentes disciplines ;
- Élaboration/adaptation d'une grille d'analyse de la qualité argumentative des élèves ;
- Retours des enseignants, analyse des débats écrits et de pré/post-tests ;
- En parallèle : expérimentation de débats sciences-sociétés ouverts à la société civile ;
- Conception participative des usages centrée sur les utilisateurs (élèves et enseignants), avec des scénarios d'usage et des planches de design d'interfaces, pour penser le développement de la plateforme AREN (les nouvelles fonctionnalités et les services d'IA et de TALN susceptibles d'être intégrés) ;
- Séminaire de bilan annuel avec un comité scientifique (évaluation et discussion des nouvelles orientations) ;
- Implémentation et intégration dans la plateforme des nouvelles fonctionnalités et des services d'IA et de TALN.

Dans ce qui suit, je vais présenter deux projets de recherche mobilisant plusieurs personnes et s'inscrivant dans le cadre du projet AREN. Initialement, pour rédiger la partie didactique du projet AREN avec Véronique Pinet et orienter le projet vers la thématique des questions socio-scientifiques, j'ai échangé avec Grégoire Molinatti (Université de la Réunion). Je me suis ensuite associé à Valérie Munier (LIRDEF) pour recruter et co-encadrer un doctorant (financé par le projet), Gabriel Pallarès, qui a commencé sa thèse lors du début officiel du projet en septembre 2016. À partir de la seconde année du projet, un second doctorant, Kévin de Checchi, a entrepris une thèse (financée par l'Université de Montpellier) que je co-dirige avec Valérie Tartas (CLLE, Université Toulouse Jean Jaurès). Ces deux thèses s'inscrivent dans un cadre de recherche commun (sections 5.2 à 5.4) pour explorer l'argumentation des élèves sur des questions socio-scientifiques au moyen d'un outil numérique de débat. Mais elles sont associées chacune à un projet de recherche spécifique ; les approches de ces projets peuvent être qualifiées respectivement de « didactique » et de « cognitive » (sections 5.5 et 5.6). Pour préparer et accompagner la mise en œuvre par les enseignants des dispositifs didactiques étudiés, nous bénéficions de l'aide de Sébastien Méjean, Ludovic Delorme et Sabrina Caliaros (DANE de l'Académie de Montpellier), Claire Ollagnon (Intactile Design), Jean Sallantin (Forum des débats) et Thibault Latrille (Controversciences).

Pour nourrir notre réflexion, nous interagissons également avec plusieurs chercheurs experts dans les domaines de l'argumentation et des questions socio-scientifiques, en particulier avec Jean et Laurence Simonneaux (EFTS, ENSFEA & Université Toulouse Jean Jaurès) et trois chercheurs faisant partie du comité scientifique d'AREN, Michael Baker (CNRS, LTCI), Karine Duvignau (CLLE, Université Toulouse Jean Jaurès) et Maria Pilar Jiménez-Aleixandre (Université de Santiago de Compostela).

5.2 Enjeux éducatifs liés à l'argumentation et aux questions socio-scientifiques

Apprendre à argumenter & argumenter pour apprendre

L'argumentation dans l'enseignement des sciences a fait l'objet d'un grand nombre d'études depuis les années 1990 (Erduran et al., 2015). Schématiquement, deux perspectives

peuvent être distinguées, lesquelles diffèrent par les finalités d'enseignement et le statut assigné à l'argumentation. Schwarz et Baker (2017, p. xv) ont proposé de les désigner par les expressions « *learning to argue* » et « *argue to learn* » (voir aussi : Erduran & Jiménez-Aleixandre, 2007, p. ix, Muller Mirza, 2008, p. 7).

Suivant la première perspective, l'argumentation constitue un *objectif d'apprentissage* : savoir argumenter est considéré en sciences comme une compétence essentielle que les élèves doivent acquérir, qui en tant que telle doit faire partie de leur culture scientifique. Certains auteurs, comme Driver et al. (2000) ou Duschl et Osborne (2002) justifient cet objectif d'apprentissage en soulignant que l'argumentation joue un rôle décisif dans les pratiques scientifiques, comme l'ont montré des recherches en sociologie des sciences (voir section 4.3) : en particulier, les données expérimentales peuvent donner lieu à un affrontement entre plusieurs interprétations, de sorte que les scientifiques doivent argumenter, c'est-à-dire justifier et/ou critiquer les différentes alternatives, jusqu'à l'obtention d'un accord.

Suivant la seconde perspective, l'argumentation constitue un *moyen d'apprentissage* des connaissances scientifiques. Cette approche, d'après Schwarz et Baker (2017, pp. 135-138) s'inscrit dans la ligne des travaux de Doise, Mugny et Perret-Clermont qui ont étudié les interactions sociales produisant des conflits socio-cognitifs (voir section 4.2) ; développant ces travaux, en particulier au niveau de l'argumentation, un ensemble de chercheurs (voir par exemple Buty & Plantin, 2008, Muller Mirza & Perret-Clermont, 2009) ont étudié le rôle de ces interactions sociales dans les processus d'apprentissage des connaissances scientifiques : non seulement, les échanges argumentés apportent une perspective contradictoire, mais aussi peuvent générer des dynamiques de coopération dans l'exploration de nouveaux phénomènes ou de nouvelles idées (Muller Mirza, 2008, p. 8).

Notons que les deux perspectives peuvent se croiser : argumenter pour apprendre des connaissances scientifiques implique le développement de compétences argumentatives ; réciproquement, des activités où les élèves doivent argumenter pour apprendre des connaissances scientifiques offrent aussi l'occasion de développer les compétences argumentatives.

Argumentation et questions socio-scientifiques

Ce statut ambivalent de l'argumentation se retrouve également dans le cadre du traitement en classe de questions socio-scientifiques (QSS), c'est-à-dire des questions controversées qui concernent la société et/ou l'environnement et qui mettent jeu les sciences et/ou les technologies. Nous entendrons ici « questions socio-scientifiques » au sens général de « *socio-scientific issues* » (SSI), expression en usage dans la littérature anglo-saxonne (Sadler, 2004, Jiménez-Aleixandre et al., 2006, Lee & Grace, 2012), plutôt qu'au sens spécifique de « questions socialement vives » (QSV), lesquelles correspondent à des QSS qui sont « vives » dans la recherche scientifique, dans la société et à l'école (Legardez & Simonneaux, 2006). L'étude en classe de QSS est l'une des voix préconisées pour une éducation à la citoyenneté : il s'agit de former les élèves, futurs citoyens, pour qu'ils soient capables de prendre part de façon éclairée aux débats et aux décisions sur les QSS (Gaussel, 2016). Cette formation implique non seulement l'enseignement de connaissances scientifiques, mais aussi un travail sur les compétences argumentatives et l'esprit critique. Il s'agit de développer chez les élèves une posture plus critique sur les sciences et leurs liens avec la société, une posture également plus « engagée » et « responsable » (Lange & Victor, 2006), comme le préconise maintenant la Commission Européenne (CE, 2012) avec l'idée de « *Responsible Research and Innovation* » (RRI). Dans cette perspective d'éducation à la

citoyenneté (ou « citoyenneté critique », Levinson et al., 2017), les compétences argumentatives et l'esprit critique sont donc un objectif d'apprentissage, en même temps qu'ils sont des moyens pour sensibiliser les élèves aux QSS.

Les QSS ne sont pas seulement controversées, mais également complexes et ouvertes (Simonneaux & Simoneaux, 2011, p. 157). Elles sont *complexes* dans la mesure où elles mettent en jeu des connaissances relevant de plusieurs domaines (scientifiques, social, économique, environnemental, etc.) ainsi que des valeurs. Elles sont *ouvertes* au sens où elles admettent plusieurs réponses différentes (par contraste avec des questions scientifiques qui idéalement admettent une seule réponse, voir Habermas, 2001), ce qui peut tenir à deux raisons : plusieurs perspectives sur ces questions sont possibles (mobilisant des arguments issus de différents domaines et/ou des valeurs différentes) ; ces questions sont généralement marquées par des incertitudes. S'agissant des incertitudes, on peut distinguer celles concernant l'évolution future de la société, de la planète, des technologies..., ou celles concernant les connaissances en jeu dans le débat (ce qui renvoie au caractère évolutif des connaissances, voir section 4.7).

Pour que les élèves puissent appréhender la complexité et le caractère ouvert des QSS, ils doivent donc être en mesure de déployer leur pensée dans un « espace de débat » (pour reprendre l'expression de Schwarz et Baker, 2017, p. 161) caractérisé par une multiplicité de lignes d'argumentation (ou « lignes de raisonnement », Jiménez-Aleixandre et al., 2006). En ce sens, l'argumentation entretient des rapports privilégiés avec les QSS, comme objectif et comme moyen d'apprentissage. C'est ce qui a motivé notre choix, dans le volet didactique du projet AREN, de porter les débats que nous expérimentons dans les classes sur des QSS. Nos motivations peuvent être résumées par les deux idées suivantes :

- Si les élèves sont préparés et/ou aidés, les QSS peuvent être le support de débats riches, propices au développement des compétences argumentatives ;
- Développer et examiner des arguments dans le cadre d'un débat sur les QSS est un moyen pour les élèves d'être sensibilisés à ces questions.

Le développement des compétences argumentatives

Depuis le début des années 1990, de nombreuses études ont été réalisées pour identifier les multiples compétences en jeu dans l'argumentation et comprendre les processus de leur apprentissage. L'argumentation étant un processus discursif par nature, des *compétences langagières* sont requises, pour exprimer les idées défendues ou critiquées et les articuler (par exemple, au moyen de connecteurs logiques et langagiers). Pour développer les raisonnements sous-jacents à l'expression et l'articulation verbalisée de ces idées, les élèves doivent également acquérir et mobiliser des *compétences cognitives*. Les principales compétences cognitives ayant été mises en avant sont les suivantes :

- Savoir se positionner par rapport à la question débattue (Kuhn et al., 2016, p. 17) ;
- Prendre conscience qu'une thèse ne va pas de soi (Golder & Favart, 2003, p. 188) et doit être justifiée (Kuhn et al., 2016, p. 20) ;
- Être capable de justifier son point de vue, c'est-à-dire articuler par un raisonnement une thèse à une ou plusieurs justifications (Garcia-Mila & Andersen, 2007, pp. 35-36) ;
- Être capable de mobiliser des données (« *evidences* ») pour appuyer une thèse ou une justification (Kuhn et al., 2016, p. 22) ;
- Savoir écouter et être capable de prendre en compte le point de vue d'autrui (Osborne et al., 2004, Sampson & Clark, 2008), ce qui implique la capacité à se décentrer et attribuer des états mentaux aux autres (Mirza et al., 2009, p. 70), mais aussi la prise de

conscience, sur le plan des idées, qu'il existe des alternatives à son propre point de vue et des justifications qui peuvent les soutenir (Kuhn et al., 2016, pp. 6 et 21) ;

- Être capable d'articuler par le raisonnement plusieurs thèses et justifications (Golder & Favart, 2003, pp. 188-189, Garcia-Mila & Andersen, 2007, pp. 35-36, Mirza et al., 2009, p. 70) ;
- Être capable de porter un regard « critique » sur les thèses avancées (que ce soit celles des autres ou les siennes), c'est-à-dire être capable de les évaluer en examinant leurs justifications ; cette compétence, difficile à acquérir, peut être qualifiée de « métacognitive », car il s'agit de « raisonner à propos d'un raisonnement » (Kuhn et al., 2016, p. 10).

En termes de développement, certaines de ces compétences cognitives sont déjà en cours d'acquisition dans la petite enfance, à travers une pratique d'argumentation associée à des situations de la vie quotidienne (Mirza et al., 2009, p. 70, Kuhn et al., 2016, pp. 11-12). Cependant, la qualité de l'argumentation des élèves reste généralement relativement faible, au moins jusqu'au niveau du collège (Kuhn et al., 2016, p. 16). Cela peut s'expliquer par le fait que certaines compétences argumentatives sont plus exigeantes sur le plan des opérations intellectuelles. Plusieurs études ont permis d'identifier un ensemble de difficultés auxquelles les élèves sont confrontés et qui font directement écho aux compétences cognitives mentionnées ci-dessus :

- Difficulté des élèves à se positionner (Kuhn et al., 2016, p. 17) ;
- Confusion entre thèse et justification (Kuhn et al., 2016, p. 10) ;
- Tendance à ignorer ce que disent les autres élèves, ou autrement dit, difficultés à tenir compte d'autres points de vue (Zeidler, 1997, Erduran et al., 2004, Sampson & Clark, 2008) ;
- Absence de conscience de la structure des arguments (Zeidler, 1997, p. 488) ;
- Tendance à avancer des justifications entachées de « *fallacies* » (Zeidler et al., 1992, Zeidler, 1997, Walton, 2010, Villarroel, Felton, M. & Garcia-Mila M., 2016) ; en particulier : problèmes de validité logique du raisonnement, généralisation abusive, biais de confirmation (qui consiste à sélectionner, interpréter ou ignorer des données pour qu'elles ne remettent pas en cause sa propre thèse).

Lorsque l'argumentation est développée par plusieurs interlocuteurs à l'oral, en situation de débat, des *aspects sociaux ou émotionnels* entrent également en jeu. Le développement de l'argumentation peut dépendre de compétences « sociales » des élèves, telles que savoir gérer les conflits, savoir écouter les autres, avoir un esprit d'équipe ou faire preuve de leadership (Reverdy, 2016, pp. 16, 18 et 20), mais aussi des relations entre les interlocuteurs du groupe et des rôles qu'ils adoptent, lesquels peuvent être symétriques ou non (ex : rôles de tuteur ou de leader) (Reverdy, 2016, pp. 7-8). Des études ont montré que dans les débats entre élèves, les prises de parole sont souvent déséquilibrées : en classe entière, la parole peut être monopolisée par certains élèves (Simonneaux & Simonneaux, 2005, p. 96) ; en petits groupes, des élèves peuvent s'imposer comme des leaders, ce qui toutefois n'empêche pas forcément le développement d'une « argumentation collaborative » (Albe, 2008, p. 84). L'attitude de certains élèves qui se mettent en retrait et participent peu ou pas aux échanges peut être liée à une forme de timidité ou de manque de confiance en soi, mais peut aussi résulter d'une difficulté à se positionner (voir ci-dessus). En outre, les échanges oraux impliquent un rapport au temps qui peut poser problème : l'immédiateté des

échanges entre en tension avec le temps nécessaire pour analyser de ce que disent les autres et murir sa propre intervention.

L'entrée dans la complexité et le caractère ouvert des questions socio-scientifiques

Dans le cas d'un débat sur une QSS, les compétences argumentatives requises sont d'un haut niveau : pour appréhender la complexité de la question et les multiples perspectives possibles, les élèves doivent être capables, non seulement d'articuler les multiples éléments d'une argumentation (à savoir, des idées, des connaissances ou des données issues de différents domaines et des valeurs), mais aussi de réorganiser ces éléments pour les considérer suivant différentes perspectives (Lee & Grace, 2012, p. 788). Pour préciser ce point, Morin et ses collègues (2014, p. 527) ont proposé un modèle des modes de raisonnement possibles sur une QSS qui distingue 4 niveaux d'appréhension de la complexité et du caractère ouvert d'une telle question (note : par souci de cohérence avec notre propos ci-dessus, nous distinguons complexité et caractère ouvert, deux caractéristiques que Morin et ses collègues rassemblent sous la même étiquette « complexité » entendue en un sens plus large) :

- Niveau 1 : une seule position sur la question est admise ;
- Niveau 2 : plusieurs positions, valeurs et connaissances sont reconnues, mais considérées de façon séparée ;
- Niveau 3 : plusieurs positions, valeurs et connaissances sont reconnues et considérées de façon intégrative, mais suivant la perspective d'un seul acteur (ou « *stakeholder* ») ;
- Niveau 4 : plusieurs positions, valeurs et connaissances sont reconnues, considérées de façon intégrative et suivant les perspectives de plusieurs acteurs.

Il ne s'agit pas simplement pour les élèves de savoir articuler les éléments d'une argumentation (exprimés ici en termes de position, valeurs et connaissances), mais également d'envisager les multiples perspectives qui peuvent être adoptées, autrement dit, les multiples manières d'articuler ces éléments. Pour envisager les différentes perspectives, les élèves doivent aussi prendre conscience de l'importance des valeurs et des intérêts des différents acteurs (Morin et al., 2014, pp. 520-521).

Les élèves sont-ils capables d'appréhender la complexité et les multiples perspectives d'une QSS ? Sur cette question, les résultats de diverses études empiriques ne sont pas convergents. Par exemple, Lee et Grace (2012) ont mené une étude avec des élèves de 12-13 ans sur la question de l'abattage de poulets contre la propagation du virus H5N1 ; cette étude montre que les élèves sont tout à fait capables d'envisager plusieurs perspectives sur la question, même avant une activité en classe à ce sujet. À l'inverse, une étude menée par Barthes et Jeziorski (2012) avec des étudiants de 3 pays révèle que ceux-ci, avant enseignement, ont tendance à avoir des représentations sur les questions de développement durable qui sont « focalisées » sur certains aspects.

S'agissant de la prise en compte des incertitudes, ce sont moins des compétences argumentatives qui semblent requises qu'une posture critique, ou autrement dit une posture de « doute » vis-à-vis des idées, des connaissances et des données en jeu dans les QSS (Simonneaux & Simonneaux, 2005, pp. 83-84, Scotto d'Apollonia, 2017), une posture « sceptique » qui doit néanmoins rester « rationnelle » (Bryce & Day, 2014). La prise en compte des incertitudes concernant les connaissances peut être liée à la reconnaissance des limites de leur domaine de validité (Morin et al., 2014, p. 521).

5.3 Comment développer l'argumentation sur des QSS ?

Comment aider les élèves à développer ces multiples compétences requises pour argumenter sur des QSS et appréhender leur complexité et leur caractère ouvert ? Un ensemble de stratégies didactiques a été proposé à cet égard. On peut schématiquement les classer suivant deux approches :

- Permettre aux élèves de *pratiquer l'argumentation* : en leur demandant de développer une argumentation (sur une QSS) ;
- Permettre aux élèves d'avoir une *activité réflexive sur l'argumentation* : en leur demandant d'analyser des arguments déjà produits (sur une QSS).

Dans la première approche, on peut distinguer le cas d'une argumentation écrite individuelle, dite « monologique », et celui d'une argumentation orale, en situation de débat entre plusieurs interlocuteurs, « dite dialogique » (Schwarz & Baker, 2017, p. 15). Dans la seconde approche, on peut distinguer le cas où les arguments ont été produits par des personnes extérieures à la classe (par exemple, dans des articles de presse) ou par les élèves eux-mêmes.

Dans un état des lieux fait en 2004 concernant l'impact de différents dispositifs didactiques sur les apprentissages des élèves, Sadler (2004) dresse un bilan mitigé : seuls certains des dispositifs testés conduisent les élèves à élever la qualité de leur argumentation. De même, en 2007, Simonneaux (2007, pp. 183-190) présente plusieurs dispositifs (par exemple avec une activité de « jeu de rôles » ou un travail d'« analyse interdiscursive » d'arguments produits) dont les résultats sont eux-aussi contrastés. Depuis, une variété de nouveaux dispositifs ont été testés. Dans leur ouvrage de synthèse plus récent sur l'argumentation à l'école (non spécifique sur les QSS), Schwarz et Baker (2017, p. 22) tirent la conclusion suivante : le dispositif mis en place joue un « rôle immense » pour permettre le développement d'une argumentation de qualité. Se concentrant sur les dispositifs mettant les élèves en situation de débats, ils mettent en avant un ensemble de « facteurs » qui peuvent influencer la qualité de l'argumentation (Schwarz et Baker (2017, chap. 6), notamment :

- La problématisation : le dispositif permet ou non aux élèves de s'approprier la question débattue (ce qui peut dépendre du fait que la question est imposée par l'enseignant ou vient des élèves) ;
- Les consignes concernant les objectifs du débat : l'enseignant donne ou non des consignes sur les objectifs du débat (par exemple : essayer de convaincre les autres sur le mode de la « dispute » (au sens philosophique) ou essayer d'explorer la question de façon collaborative sur un mode « délibératif ») ;
- Le guidage de l'enseignant : en particulier, l'enseignant peut se mettre en retrait, introduire lui-même de nouvelles idées dans le débat ou intervenir de façon plus indirecte par exemple en demandant de justifier, d'explicitier ou de reformuler ;
- La configuration des groupes : l'enseignant peut choisir de faire débattre ensemble des élèves qui sont initialement en désaccord (dans l'idée de favoriser un conflit socio-cognitif) ou plutôt d'accord (dans l'idée de favoriser la collaboration) ;
- Les connaissances préalables des élèves : faire débattre les élèves sur une question sur laquelle ils possèdent ou non des connaissances.

Plusieurs études empiriques ont été menées afin d'examiner ces facteurs. Concernant la problématisation, Schwarz et Baker (2017, pp. 185-186) mentionnent des recherches qui montrent l'importance de faire en sorte que les élèves s'approprient la question débattue. S'agissant des consignes, deux études ont conduit à des résultats contradictoires : une étude montre que la demande de faire un débat délibératif est plus productive que la demande de faire un débat persuasif ; une autre montre le contraire (*ibid.*, pp. 187-188). À propos du guidage des enseignants, la forme d'aide qui paraît la plus constructive, d'après plusieurs études, est celle consistant, non pas à apporter eux-mêmes des clarifications sur les idées débattues, mais à faire des demandes de justifications ou d'explicitations (*ibid.*, pp. 188-189). Concernant la configuration des groupes, Schwarz et Baker (2017, pp. 185-186) estiment que le conflit socio-cognitif n'est pas une condition nécessaire pour stimuler un débat productif et pointent le fait que des ressources (par exemple, un texte) peuvent tout aussi bien apporter la contradiction aux points de vue des élèves et les engager dans une délibération productive. Enfin, pour ce qui est des connaissances préalables, ils pointent le fait que les élèves, pour déployer une argumentation, ne peuvent pas être ignorants concernant la question débattue (*ibid.*, p. 212). Sur ce dernier point, on peut mentionner des études empiriques qui apportent des éléments complémentaires. D'après certaines études, le fait que les élèves aient des connaissances scientifiques ou non n'a qu'un faible impact sur l'opinion qu'ils ont sur les QSS (Simonneaux & Simonneaux, 2005, p. 85, Lewis & Leach, 2006). Sadler et Fowler (2006, pp. 989-990) ont développé un modèle de la qualité argumentative en fonction de la maîtrise des connaissances scientifiques selon lequel la relation est non linéaire ; sur la base d'une étude empirique, trois niveaux de qualité argumentative sont distingués (le passage entre ces niveaux correspondant à deux seuils à franchir) : (1) maîtrise du vocabulaire et des concepts de base du domaine scientifique concerné, (2) connaissances avancées ; entre ces seuils, l'acquisition de connaissances n'a que peu d'impact.

Un autre facteur qui semble déterminant pour aider les élèves à développer leurs compétences argumentatives concerne, non pas le dispositif didactique en tant que tel, mais le nombre de fois que celui-ci est mis en œuvre. En effet, des gains significatifs ont été obtenus concernant la qualité argumentative des élèves dans des études où le nombre de séances de débat est élevé, par exemple avec 16 séances (Kuhn & Udell, 2003) ou 13 séances (Kuhn et al., 2016). Dans ces deux études, la comparaison avec des groupes contrôles, où les élèves traitent les mêmes contenus mais sans débattre, montre que c'est bien la pratique répétée du débat qui est décisive, avec des progrès observés qui sont graduels au cours des séances.

S'agissant des dispositifs invitant les élèves à effectuer un travail réflexif sur des arguments produits, plusieurs études empiriques ont été menées qui montrent un impact positif de tels dispositifs sur la qualité argumentative (Zohar et Nemet, 2002, Felton, 2004, Iordanou, 2010). À noter que dans les études de Zohar et Nemet (2002) et Iordanou (2010), le dispositif didactique est caractérisé par un apport « explicite » des enseignants sur la structure des arguments (par exemple, sur la notion d'« *evidence* » pour soutenir une affirmation). L'étude de Felton (2004) montre plus précisément qu'un dispositif combinant pratique de débat et réflexion sur les arguments produits favorise davantage le développement de la qualité argumentative des élèves qu'un dispositif avec pratique de débat seul.

Cette dernière étude illustre le fait que les deux approches mentionnées plus haut peuvent tout à fait être conciliées dans un même dispositif. Dans le cadre du projet AREN, nous optons pour une telle stratégie didactique combinant pratique du débat et activité réflexive.

5.4 Le numérique : un nouveau champ de possible

Les apports du numérique

Nous venons de le voir, l'élaboration du dispositif didactique est déterminant pour développer ou non chez les élèves leurs compétences argumentatives. À cet égard, les outils numériques ouvrent un nouveau champ de possible : ils permettent d'envisager de nouveaux types d'activités pour les élèves et de nouveaux rôles pour l'enseignant. Un ensemble de recherches ont été menées à l'aide de plateformes numériques de débat. Celles-ci ont permis de mettre en évidence plusieurs apports du numérique (Clark et al., 2007, Clark & Sampson, 2008, Schwarz & Baker, 2017, pp. 197-201), en particulier :

- Favoriser la participation d'un plus grand nombre d'élèves au débat ;
- Limiter les obstacles psycho-sociaux liés aux situations de face-à-face (ex : timidité à parler en public, compétition dans la prise de parole, rôle prédominant des émotions, immédiateté des échanges) ;
- Permettre la réalisation de débats synchrones ou asynchrones, en classe ou à distance (depuis la maison) ;
- Offrir du temps et un accès enrichi à l'information au cours d'un débat, ce qui possiblement permet aux élèves de mieux construire leurs arguments et de mobiliser plus de connaissances et de données ;
- Permettre d'analyser les échanges dont on garde la trace écrite, support possible pour un travail réflexif (qui en partie peut être mené en autonomie par les élèves).

Notons qu'avec le numérique, les débats prennent une forme nouvelle, à mi-chemin entre le débat écrit et le débat oral : concrètement, les élèves doivent écrire leurs arguments ; cependant, la dynamique des échanges correspond davantage à celle d'un débat oral.

Bien que ces apports du numérique apparaissent séduisants, peu d'études ont été menées afin de comparer les effets d'un dispositif basé sur une plateforme numérique de débat avec ceux d'un dispositif basé sur un débat oral sans numérique (Schwarz & Baker, 2017, p. 200). En outre, l'utilisation du numérique présente plusieurs inconvénients (non spécifiques au débat numérique). Premièrement, les enseignants mettant en œuvre une activité en classe basée sur des outils numériques doivent souvent faire face à des problèmes techniques, en particulier de connexions. Deuxièmement, l'utilisation par les élèves d'un outil numérique implique une attention portée à l'outil, à sa compréhension et sa maîtrise, possiblement au détriment des apprentissages visés.

Dans le cadre d'AREN, nous n'envisageons pas l'outil numérique dans une perspective comparatiste par rapport à d'autres outils didactiques, mais plutôt comme un moyen d'explorer de nouvelles modalités dans les dispositifs centrés sur un débat.

Les spécificités de la plateforme AREN

La plateforme numérique AREN développée dans le cadre de notre projet est un outil de débat en ligne qui se distingue d'autres outils à plusieurs égards. Premièrement, le point de départ du débat n'est pas une question, mais un texte (voir la partie gauche de la figure 6).

Une autre spécificité de la plateforme AREN est qu'elle demande aux élèves : (1) de sélectionner le passage du texte ou de l'intervention d'un autre élève auquel ils veulent réagir, (2) de reformuler ce passage dans leurs propres mots, (3) de se positionner par rapport à ce passage (d'accord / pas d'accord) ou dire qu'ils n'ont pas compris, (4) avant de poster leur propre argument (comme indiqué dans la figure 8). Cette fonctionnalité de reformulation a été imaginée par Véronique Pinet dans l'idée de favoriser l'écoute entre les élèves et la prise en compte des arguments des autres.

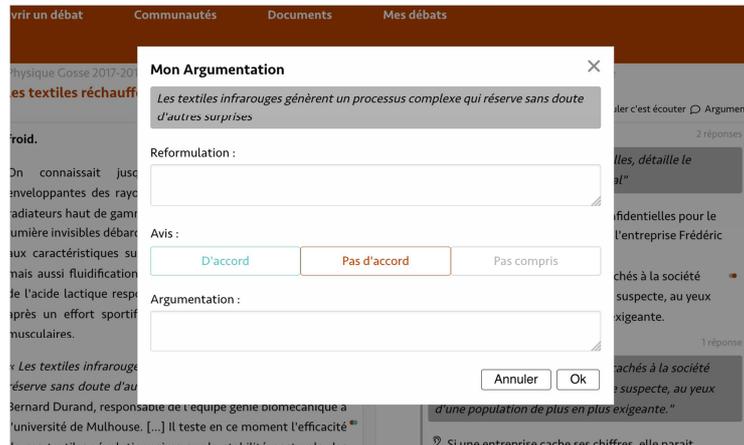


Figure 8 – Interface de la plateforme AREN où l'élève peut poster son argument après avoir reformulé le passage auquel il veut réagir

Précisons que le projet AREN prévoit de faire évoluer la plateforme numérique. À cet égard, les retours des expérimentations dans les classes peuvent alimenter la réflexion qui est menée dans des réunions de co-conception participatives. Il est question de prendre en compte à la fois le point de vue des usagers (élèves et enseignants) et les apports de la recherche sur le plan didactique. À noter que l'intégration d'intelligence artificielle, absente dans la version actuelle de la plateforme, est prévue dans le projet AREN.

Hypothèses associées à la plateforme AREN

Au regard de ces spécificités, la plateforme AREN ouvre sur de nouvelles perspectives en termes de dispositif didactique.

Premièrement, le fait que le débat ait pour point de départ un texte peut donner l'occasion aux élèves de choisir les idées qui les intéressent et faire émerger leurs propres questions. On peut faire l'hypothèse que la problématisation par les élèves soit ainsi favorisée.

Deuxièmement, la plateforme accorde une place importante à la reformulation, laquelle est demandée aux élèves avant de faire une intervention. Cette phase de reformulation peut être considérée comme faisant partie intégrante de l'activité argumentative : une argumentation de qualité implique la prise en compte des idées (points de vue et justifications) des autres interlocuteurs ; pour prendre en compte ces idées, il convient de les comprendre ; un moyen de les comprendre est de les reformuler. De ce point de vue, on peut supposer que la demande de reformulation de la plateforme AREN est susceptible de favoriser la prise en compte des arguments des autres et permet de développer une argumentation de plus grande qualité. Toutefois, comme c'est le cas pour tout nouvel outil technique, un écart peut apparaître entre l'usage prévu et les usages effectifs. On peut ainsi s'attendre à d'autres types d'usages de cette « reformulation » : un détournement de

l'usage prévu consistant par exemple à émettre une appréciation sur ce qui a été sélectionné ; un usage de type « copier-coller » sans garantie d'une réelle appropriation de ce qui a été sélectionné ; un usage plus dialogique consistant, non seulement à reformuler, mais aussi à prolonger le raisonnement d'autrui.

Troisièmement, la plateforme donne la possibilité aux élèves d'adresser aux autres une demande de clarification par le biais de la case « pas compris ». Ainsi, le guidage de l'enseignant consistant justement à demander aux élèves d'explicitier leurs arguments se voit ici implémenté dans le logiciel et donné à la charge des élèves. En outre, du côté de l'élève qui formule cette demande, une prise de conscience de son propre état épistémique peut ainsi être favorisée (en l'occurrence, la prise de conscience de ne pas comprendre ce que dit autrui), ce qui constitue une activité de nature métacognitive. Pour ces deux raisons, on peut faire l'hypothèse que l'utilisation de cette case « pas compris » ait un impact positif sur la qualité argumentative.

Ce sont trois hypothèses originales que le projet AREN permet d'explorer. La première est examinée dans le cadre du projet de recherche décrit dans la prochaine section. Je reviendrai sur les deux autres hypothèses dans la partie « perspectives » (section 5.7).

5.5 Projet de recherche sur l'impact d'un dispositif didactique innovant

Questions de recherche spécifiques

Une question générale portant sur l'argumentation et l'éducation à la citoyenneté basée sur l'étude de QSS était formulée plus haut en ces termes : Comment aider les élèves à développer leurs compétences pour argumenter sur des QSS et appréhender la complexité et le caractère ouvert de telles questions ? Tenant compte du contexte spécifique du projet AREN centré sur l'évaluation et le développement d'une plateforme numérique de débat, cette question peut être déclinée en ces termes : Quels peuvent être les apports d'un outil numérique de débat pour aider les élèves à développer leurs compétences pour argumenter sur des QSS et appréhender la complexité et le caractère ouvert de telles questions ? En particulier, quels sont les apports possibles d'un débat basé sur un texte et d'une restitution écrite du débat ?

Telles sont les questions que nous étudions dans le projet de recherche associé au travail de thèse de Gabriel Pallarès, que je co-encadre avec Valérie Munier. Dans ce qui suit, je vais en préciser les contours en présentant successivement : la méthode générale de cette recherche ; la conception du dispositif didactique ; le terrain de recherche ; le recueil des données ; la méthode d'analyse des données faisant appel notamment à des éléments de modélisation de l'argumentation ; les premiers résultats.

Une recherche collaborative et itérative

Pour mener cette recherche, nous suivons une méthode de type « *design experiment* » (Cobb et al., 2003, diSessa & Cobb, 2004, Sandoval, 2013) à l'instar de la recherche sur l'enseignement de l'énergie décrite dans la partie 3. Celle-ci se caractérise comme étant collaborative et itérative :

- *Collaborative* au sens où la recherche est menée par une équipe impliquant des chercheurs et des enseignants du lycée, afin de construire une séquence qui fasse sens pour les enseignants, qui ne soit pas en rupture avec leurs pratiques usuelles, qui soit adaptée à leurs élèves et qui soit compatible avec les contraintes de l'institution scolaire ;

- *Itérative* au sens où le dispositif didactique est appliqué dans les classes, évalué et réajusté au cours de quatre boucles d'expérimentations, permettant des ajustements et ainsi un perfectionnement de celle-ci.

Pour la description plus précise et les intérêts de cette méthode, je renvoie à la section 3.7.

La conception d'un dispositif didactique centré sur un débat numérique

L'étude de nos questions de recherche se base sur l'expérimentation dans des classes de lycée de la plateforme AREN. Or, cette plateforme ne constitue pas à elle seule un dispositif didactique. Il convient de préciser comment celle-ci est utilisée en classe, ce qui est fait avant et après le débat. Autrement dit, l'étape préalable aux expérimentations est celle de la conception du dispositif didactique intégrant la plateforme. Deux principes guident ce travail. D'une part, nous cherchons à concevoir un dispositif qui soit le plus pertinent possible du point de vue des apprentissages des élèves. Pour ce faire, nous nous appuyons sur les éléments de la littérature présentés ci-dessus (sections 5.2 à 5.4), mais aussi, pour les années 2 à 4, sur les résultats de nos expérimentations (celles-ci étant réitérées sur 4 années). D'autre part, suivant la méthode du *design experiment* décrite ci-dessus, nous associons les enseignants au travail de conception du dispositif.

La trame du dispositif didactique reprend celle imaginée et expérimentée par Véronique Pinet. Elle se compose de trois phases : une phase de préparation, une phase de débat numérique synchrone et/ou asynchrone et une phase de synthèse réflexive sur le débat. Comme indiqué plus haut (section 5.3), la forme spécifique que prend le dispositif didactique a un rôle déterminant dans le développement ou non des compétences argumentatives des élèves. Il s'agit donc de penser plus précisément la manière dont les trois phases peuvent être réalisées. Nous prenons en compte les facteurs suivants : problématisation, consignes concernant les objectifs du débat, guidage de l'enseignant, connaissances préalables des élèves (facteurs décrits dans la section 5.3 et repris de Schwarz et Baker, 2017), nombre de séances ou de séquences. En outre, pour déterminer les critères de choix des textes à débattre et le travail à faire réaliser aux élèves en phase de synthèse réflexive, nous nous appuyons sur des éléments de la littérature présentés plus haut concernant l'apprentissage de l'argumentation et l'éducation à la citoyenneté basée sur l'étude de QSS. Les précisions sur les dispositifs didactiques tels qu'ils ont été pensés lors des deux premières années (2016-2017 et 2017-2018) sont données dans le tableau 7.

Dispositif didactique de l'année 1	Dispositif didactique de l'année 2
<p>Phase de préparation : 2 ou 3 séances au cours desquelles les élèves étudient un ensemble de corpus (textes, sites internet et vidéos) sur le thème socio-scientifique (TSS), afin de les alimenter en termes de définitions, de connaissances et d'arguments potentiels</p>	<p>Phase de préparation : <i>Idem</i> + « carnet de bord » individuel dans lequel les élèves inscrivent les éléments qu'ils jugent intéressants et qui pourraient être utiles pour débattre sur ce thème (définitions, connaissances, points de vue argumentés)</p>
<p>Phase de débat numérique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - débat en classe d'environ 50 min - point de départ : un texte court, polémique et bien argumenté (afin de stimuler la discussion et de donner le modèle d'une argumentation de qualité) - consignes à la main des enseignants, plutôt centrées sur l'utilisation de la plateforme - pas d'intervention demandée aux enseignants afin de privilégier la liberté de paroles des élèves 	<p>Phase de débat numérique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - débat en classe d'environ 1h avec le carnet de bord à disposition - point de départ : <i>idem</i> - consignes : les élèves doivent débattre entre eux pour aboutir ensemble à une meilleure compréhension du texte et de la question générale, dans un esprit de coopération ; clarification sur le rôle de la reformulation - intervention demandée aux enseignants au cours du débat : pour souligner l'importance de justifier son point de vue et indiquer que le bouton « pas compris » permet aux élèves de demander aux autres de clarifier ou de mieux justifier ce qu'ils affirment
<p>Phase de synthèse réflexive : classements à effectuer par les élèves des arguments extraits du débat numérique (en discutant leurs critères) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - avec une justification / sans justification - identification des différents domaines du TSS - repérage de raisonnements fallacieux 	<p>Phase de synthèse réflexive : classements à effectuer après le premier débat :</p> <ul style="list-style-type: none"> - avec une justification / sans justification - identification des différents domaines du TSS - repérage d'incertitudes - repérages de valeurs <p>classements à effectuer après le second débat :</p> <ul style="list-style-type: none"> - identification des différents domaines du TSS - non justifié / mal justifié / bien justifié + en groupe, les élèves doivent écrire leurs critères pour chaque post analysé + discussion collective de ces critères

Tableau 7 – Dispositifs didactiques prévus du projet AREN pour les années 1 et 2

Le terrain de recherche

Ce dispositif didactique est développé avec, et expérimenté par, des enseignants du lycée de plusieurs disciplines : 10 enseignants l'année 1, 11 enseignants l'année 2 (dont 7 ayant participé l'année 1 à la recherche)⁴. Chacun des enseignants a réalisé une séquence centrée autour d'un débat numérique l'année 1, et deux séquences l'année 2 (en cours). Les disciplines et les thèmes sont décrits dans le tableau suivant :

⁴ Élodie Baret, Sophie Brousse, Flavie Escoi, Christine Fraisse, Thomas François, Régis Galmiche, Maryline Groussac, Laurie Klin, Antonin Marc, Christine Nougarede, Sylvie Roche, Philippe Rouquette, Isabel Servanton et Christelle Stentelaire.

Terrain de l'année 1	Terrain de l'année 2
2 enseignants de SVT en 2 ^{nde} 1 débat : biodiversité et activité humaine	2 enseignants de SVT en 2 ^{nde} 2 débats : santé, corps et sport ; les sources d'énergie fossiles et renouvelables
2 enseignants de géographie en 2 ^{nde} 1 débat : énergie et gaz de schiste	3 enseignants de géographie en 2 ^{nde} 2 débats : nourrir les humains ; l'arctique et ses enjeux géostratégiques
3 enseignants de SPC en 1S 1 débat : énergie et voiture électrique	3 enseignants de SPC en 2 nd 2 débats : les textiles et molécules innovants ; la conquête de Mars
3 de philosophie en T STMG et STI2D 1 débat : bioéthique et eugénisme	3 de philosophie en TL, TS et TEL 2 débats : l'intelligent design ; l'éthique animale

Tableau 8 – Terrain de recherche des années 1 et 2 (disciplines et thèmes)

Nous avons organisé plusieurs journées de formation et de co-conception des dispositifs didactiques avec les enseignants (1 journée + 1 demi-journée l'année 1 / 1 journée + 2 demi-journées l'année 2), puis une journée de retour collectif lors de laquelle les enseignants ont rendu compte de leurs expériences et formulé un ensemble de propositions constructives.

Le recueil de données

Afin d'évaluer les apports de notre dispositif didactique pour développer les compétences des élèves à argumenter sur des QSS et appréhender la complexité et le caractère ouvert de ces questions, nous procédons au recueil d'un ensemble de données :

- Les interventions écrites des élèves au cours des débats avec la plateforme AREN ;
- Des pré-test/post-tests dans lesquels il est demandé aux élèves de se positionner (« Tout à fait d'accord », « Plutôt d'accord »,...) par rapport à une affirmation sur une question socio-scientifique liée au thème étudié en classe (ex : Que penses-tu de cette affirmation ? « Tant que des sources d'énergie fossiles restent disponibles, nous devrions continuer à les exploiter »), puis de justifier leur position en répondant à la question ouverte « Pourquoi ? » ; lors du post-test de l'année 2, les élèves ont à leur disposition leur production du pré-test, la consigne étant formulée ainsi : « Pourquoi ? Recopie, complète ou modifie ton premier texte en t'appuyant sur tout ce que tu as vu sur ce sujet depuis » ;
- Captation vidéo des phases de débat en classe et de synthèse réflexive dans 4 classes sur 10 (1 par discipline) (année 1) ;
- Fiches de suivi remplies par les enseignants concernant le déroulement prévu de leurs séquences ;
- Retour oral collectif des enseignants, lors de la dernière réunion (3h15), concernant les séquences effectivement mises en place : sur les aspects techniques liées à la plateforme, les réactions des élèves et leur appréciation sur le plan didactique des 3 phases des séquences ;

- Notes moyennes des élèves dans les différentes disciplines ; indications des enseignants sur la personnalité des élèves et leur attitude habituelle en classe (ex : élèves plutôt timides).

Le développement d'une grille d'analyse – partie 1

Les vidéos de classe (prises l'année 1), les fiches de suivi et le retour oral collectif des enseignants ne font pas l'objet d'une analyse fine et systématique. Cependant, ces données nous permettent d'avoir connaissance du déroulement effectif des séquences dans les classes et sont susceptibles d'apporter des informations complémentaires pour interpréter les données principales qui sont analysées.

Les productions des élèves lors des débats et lors des pré-/post-tests sont analysées au moyen d'une grille d'analyse nous permettant d'évaluer la qualité de l'argumentation des élèves, la manière dont ils appréhendent la complexité et le caractère ouvert des QSS et, de façon indirecte, le degré de problématisation. Les éléments théoriques et empiriques de la littérature présentés ci-dessus (sections 5.2 à 5.4) permettent de dégager un premier ensemble d'indicateurs.

Degré de problématisation

Le dispositif du débat numérique, qui met en retrait l'enseignant (lequel ne pose pas de question et ne guide pas la discussion), offre aux élèves un espace de liberté dans la prise de parole et le choix des discussions. Que font les élèves de cet espace de liberté ?

Premièrement, nous pouvons nous demander s'ils entrent dans une réelle discussion du thème socio-scientifique (TSS) associé au texte ou s'ils détournent l'outil numérique pour mener des discussions périphériques. Les indicateurs que nous regardons à cet égard sont les suivants :

- Pourcentage respectif d'interventions à propos du thème et d'interventions hors sujets et pouvant être considérés comme des bavardages périphériques ;
- Nombre total et longueur des interventions à propos du thème par débat, à rapporter au temps donné aux élèves pour débattre.

Deuxièmement, le dispositif de débat numérique (texte et débat synchrone) favorise-t-il la problématisation, c'est-à-dire l'appropriation des questions débattues par les élèves ? En l'absence de QSS posée explicitement par l'enseignant, nous pouvons nous demander si les élèves se saisissent du texte pour explorer différents aspects du TSS et débattre de différentes questions associées (qu'elles soient explicitement formulées ou non). Pour étudier ce point, nous menons une analyse macroscopique de la structure arborescente des débats en nous attachant aux indicateurs suivants :

- Nombre de passages du texte sélectionnés et discutés par les élèves : donnée qui permet de déterminer si le texte génère de nombreuses discussions ou non ;
- Nombre total de branches (c'est-à-dire des chaînes d'interventions reliées entre elles) : donnée qui permet de déterminer si le dispositif de débat numérique génère de nombreuses discussions ou non ;
- Longueur des branches : donnée qui permet de déterminer si les élèves développent ensemble, sans l'enseignant, une discussion prolongée (possiblement une discussion approfondie).

Appréhension de la complexité et du caractère ouvert des QSS

Considérons les indicateurs liés spécifiquement aux QSS. La complexité de ces questions résulte notamment de la mise en jeu de connaissances relevant d'une multiplicité de domaines (scientifiques, social, économique, environnemental, etc.) et de valeurs. À propos de ces 2 éléments, nous avons repris l'indicateur suivant (indicateur utilisé notamment dans Simonneaux & Simonneaux, 2005, et Jiménez-Aleixandre et al., 2006) :

- *Indicateur « domaines de la QSS et valeurs »* : présence ou non des différents domaines et des valeurs dans les productions des élèves ; dans le cas des débats : proportion relative de ces domaines et valeurs.

Construit ainsi, l'indicateur ne permet pas de différencier les niveaux 2 à 4 d'appréhension de la complexité du modèle de Morin et al. (2014) (voir section 5.3), c'est-à-dire de déterminer si les élèves articulent dans leurs discours les différents domaines et valeurs (niveaux 3 et 4) ou se contentent de les juxtaposer (niveau 2). Il nous faut réfléchir sur la possibilité d'opérer cette distinction pour l'analyse des données de l'année 2.

Le caractère ouvert des QSS est lié à la multiplicité des domaines et des valeurs, mais aussi aux incertitudes. Nous avons donc retenu l'indicateur suivant :

- *Indicateur « incertitudes »* : mention ou non d'incertitudes (concernant l'évolution future de la société, de la planète, des technologies... et/ou les connaissances).

Suivant Morin et al. (2014), on peut considérer également qu'un indicateur indirect de la prise en compte des incertitudes est la mention du domaine de validité des connaissances :

- *Indicateur « domaine de validité »* : dans le cas où des connaissances sont mobilisées, mention ou non de leur domaine de validité.

En outre, l'analyse macroscopique de la dynamique des débats, nous donne une indication sur la manière dont les élèves explorent le TSS associé au texte. Pour mener cette analyse nous reprenons la représentation arborescente des débats et projetons le codage en termes de domaines du TSS sur les interventions des élèves. Nous pouvons ainsi analyser les domaines présents dans chaque branche et, dans le cas de plusieurs domaines présents, la dynamique de l'enchaînement de ces domaines.

Qualité de l'argumentation

Tournons-nous vers l'évaluation de la qualité de l'argumentation, qui donne également une indication sur la manière dont les élèves explorent la complexité et le caractère ouvert des QSS. Parmi l'ensemble des compétences argumentatives et des difficultés mentionnées plus haut (section 5.2), il nous faut faire un choix : toutes ne sont pas forcément pertinentes à étudier dans le contexte de notre projet et certaines sont peut-être plus difficiles à évaluer avec les données dont nous disposons.

Deux premiers indicateurs nous ont semblés pertinents pour évaluer la qualité argumentative de l'ensemble des affirmations (dans le débat ou dans les pré-/post-tests) :

- *Indicateur « justification »* : les élèves justifient ou non leurs affirmations ; dans le cas positif : nombre de justifications formulées.
- *Indicateur « connaissances »* : les connaissances mobilisées par les élèves sont « correctes » ou non (au regard des connaissances stabilisées et clairement reconnues comme non problématiques par l'institution).

Éléments de modélisation de l'argumentation

Les affirmations formulées dans une argumentation n'ont pas toutes la même fonction. Afin de distinguer les différents types d'affirmations possibles et de dégager ainsi d'autres indicateurs de la qualité argumentative, nous nous appuyons sur la littérature spécialisée sur l'argumentation (non limitée au domaine de l'éducation). Dans cette optique, je vais présenter des éléments de la littérature permettant de proposer un modèle simple et opératoire de l'argumentation (à titre provisoire et sans rechercher l'exhaustivité).

Premièrement, l'argumentation est un objet aux multiples facettes et peut donc être étudiée suivant plusieurs approches. Plantin (2005, chap. 1) a décrit en détail ces approches en les inscrivant dans une évolution historique. Pour le dire de façon schématique, nous pouvons dire que l'argumentation correspond à :

- Un mode de raisonnement ; dans la tradition d'Aristote, cette facette est étudiée dans le domaine de la « logique » (ou « art de penser correctement ») ;
- Une pratique discursive, utilisant une langue naturelle ; ce qui renvoie au domaine de la « rhétorique » (ou « art de bien parler ») ;
- Un type de dialogue opposant plusieurs interlocuteurs qui avancent des thèses, des arguments et des contre-arguments ; à ce propos, Aristote parle de « dialectique » (ou « art de bien dialoguer »).

Cherchons à préciser ces caractéristiques. Pour décrire le mode de raisonnement qui caractérise l'argumentation, Toulmin (1958, chap. III) a proposé un modèle qui constitue une référence majeure dans la littérature sur l'argumentation en didactique des sciences. Ce modèle décrit l'argumentation comme une forme de raisonnement qui part de « prémisses » pour en inférer une conclusion, laquelle correspond à la thèse affirmée ou « affirmation » (« *claim* »). L'argumentation apparaît alors similaire à une démonstration. Cependant, une argumentation diffère d'une démonstration dans la mesure où l'inférence ne correspond pas à une déduction logique, ou autrement dit, à une inférence certaine. L'un des apports du modèle de Toulmin réside dans la différenciation qui est proposée entre trois types de prémisses (« *data* », « *warrant* » et « *backing* ») et deux types d'éléments qui précisent en quoi l'inférence n'est pas certaine (« *qualifier* » et « *rebuttal* »). Ces termes ne sont pas tous évidents à traduire ; voici des traductions possibles : *data* = donnée ; *warrant* = garantie ou loi de passage ; *backing* = fondement ou support ; *qualifier* = modalisateur ou modalité ; *rebuttal* = restriction ou réfutation. Plutôt que de définir chacun de ces éléments, je propose ici d'en redonner l'une des illustrations de Toulmin (1958, p. 97) :

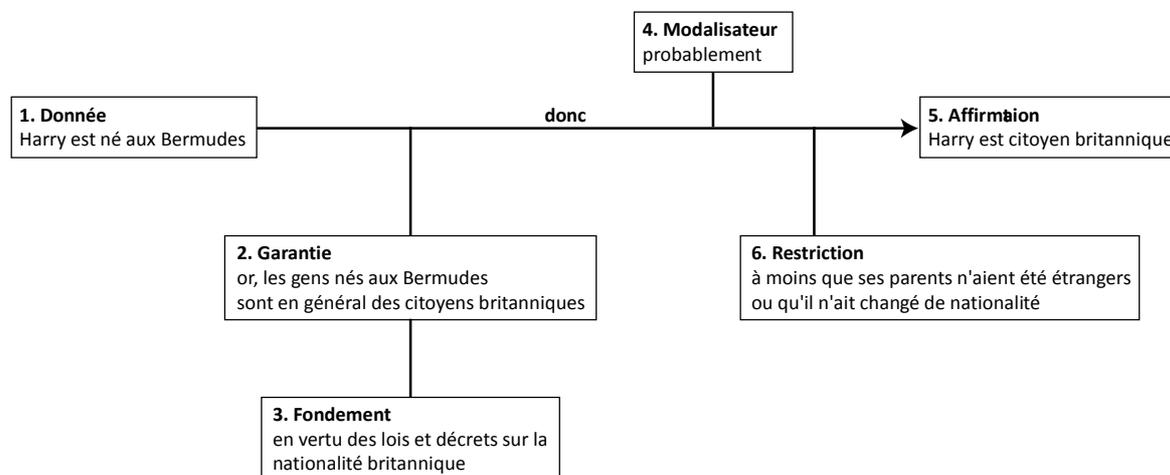


Figure 9 – Modèle de la structure d'un argument selon Toulmin (1958)

On le voit dans cet exemple, le modèle de Toulmin décrit également les liens entre les éléments d'une argumentation. En réalité, il n'est pas tant question ici du processus de l'argumentation que de son produit, à savoir l'argument. En d'autres termes, ce modèle offre une description fine de la structure d'un argument. De façon très minimale, un argument peut être défini comme une thèse accompagnée d'une justification. Si l'on parle ainsi en termes de « justification », le modèle de Toulmin revient à différencier des types d'éléments de justification et à préciser la manière dont ils sont reliés entre eux et à la thèse.

Dans l'idée d'évaluer la qualité des arguments des élèves, plusieurs chercheurs ont utilisé le modèle de Toulmin pour le traduire dans une grille d'analyse en étudiant la présence et le nombre des différents éléments distingués par le modèle (Erduran et al., 2004). Cependant, l'application de la grille pose des difficultés. En particulier, Erduran et ses collègues (2004, pp. 918-919) constatent qu'il est difficile en pratique de distinguer dans le discours des élèves les affirmations, données, garanties et fondements. Ils pointent l'importance du contexte de chaque énoncé (ou section d'énoncé). Par exemple, selon le contexte, un même énoncé peut être vu comme une affirmation ou comme une garantie au service d'une autre affirmation. De même, la différenciation entre garantie et fondement exige une analyse très fine. Selon certains auteurs, cette différenciation n'est simplement pas possible en raison du discours parfois « elliptique » des élèves (Simonneaux & Simonneaux, 2005, pp. 90-91). Par conséquent, ce qui constitue la contribution du modèle de Toulmin, à savoir la finesse de la description de la structure d'un argument, apparaît en même temps un inconvénient pour son utilisation.

Par ailleurs, ce modèle porte sur l'argumentation associée à un locuteur seul. Il s'inscrit en ce sens dans une approche « monologique » de l'argumentation (Schwarz & Baker, 2017, p. 66). Ceci peut être nuancé si l'on considère les deux éléments que sont le modalisateur et la restriction comme des prises en compte de contre-arguments susceptibles d'être avancés par un interlocuteur (point souligné par Plantin, 2005, p. 21-22, concernant le modalisateur uniquement). Ces deux éléments pourraient être vus comme l'expression de la dimension dialogique d'un argument. S'ils sont effectivement intégrés dans un argument parce qu'un interlocuteur les a énoncés, ils constituent ce que l'on peut appeler une « nuance » ou une « concession ».

Comme indiqué ci-dessus, le modèle de Toulmin décrit le produit fini de l'argumentation (un argument) et non le processus de l'argumentation. Cette distinction entre produit et processus a été soulignée par plusieurs auteurs (Duschl & Osborne, 2002, Jiménez-Aleixandre & Erduran, 2007, Kuhn et al., 2016, Macagno, 2016). Au sujet de l'argumentation comme processus, un point généralement mis en avant et parfois présenté comme une critique contre le modèle de Toulmin est l'idée que l'argumentation est un processus dialogique (ex : Simonneaux & Simonneaux, 2005, pp. 90-91, Plantin, 2016). L'argumentation peut être considérée comme « dialogique » lorsque elle est développée dans un dialogue, c'est-à-dire dans le contexte d'un échange verbal entre plusieurs interlocuteurs (Kuhn et al., 2016, p. 11). Indépendamment de la présence effective d'interlocuteurs, l'argumentation peut aussi être décrite comme un processus « dialogique » en un autre sens : une personne cherche à justifier une thèse uniquement si elle admet que celle-ci est discutable, possiblement par un interlocuteur. C'est la possibilité de la mise en doute de la thèse, de la contradiction apportée par l'interlocuteur, qui déclenche l'activité argumentative, comme le souligne Plantin (2005, p. 52). Driver et ses collègues (2000, p. 291) soutiennent également en ce sens que « construire un argument implique de considérer des positions alternatives ».

Or, l'interlocuteur peut être virtuel ou imaginé, de sorte que l'argumentation peut être développée dans un « dialogue intérieur » (Plantin, 2005, p. 54). L'argumentation d'un élève, lorsqu'elle est développée dans un texte individuel (ex : une dissertation) pourra être qualifiée de « monogérée » au sens où elle est produite par l'élève seul, ou « polygérée » au sens où elle est motivée par des contradicteurs virtuels.

En outre, le processus cognitif (ou « psychologique », Schwarz & Baker, 2017, p. 64) de production d'un argument n'est pas une inférence de prémisses vers une conclusion, comme le suggère le modèle de Toulmin – ce modèle décrivant plutôt la forme d'un argument tel qu'il peut être énoncé une fois que l'argument a déjà été produit. Le processus cognitif de production d'un argument correspond plutôt à un « processus rétroactif », suivant l'expression de Schwarz et Baker (2017, p. 64), c'est-à-dire un processus par lequel un locuteur cherche à justifier une thèse, qui est le point de départ, en remontant dans la chaîne des justifications (par exemple, en remontant de la thèse aux données, puis aux garanties, puis aux fondements).

Comme indiqué ci-dessus, cette recherche des justifications d'une thèse par un locuteur est motivée par la critique d'un interlocuteur réel ou imaginé. Or, on peut considérer que cette activité critique constitue une partie intégrante du processus argumentatif. Celle-ci repose sur la prise en compte et l'évaluation par chacun des interlocuteurs des thèses et justifications des autres. Elle conduit à la production d'affirmations portant sur les idées des autres, par contraste avec celles portant sur ses propres idées. Ces affirmations peuvent consister à apporter une *nuance* ou formuler une *réfutation* de la thèse ou de la justification d'autrui. En réponse à de telles critiques, un interlocuteur peut contre-attaquer : par de nouvelles justifications de sa propre thèse, par des justifications de ses premières justifications, par des nuances ou des réfutations des objections de l'autre. Ou au contraire, il peut faire une *concession*, c'est-à-dire accepter sa critique, tout ou en partie. Il peut aussi être d'accord avec ce qu'affirme autrui et *développer* ses idées. Enfin, il peut *questionner* les idées d'autrui, sans nécessairement les réfuter. L'argumentation peut ainsi être modélisée comme un *processus dialogique constitué de mouvements argumentatifs* successifs produits par les interlocuteurs (figure 10). Nous reprenons ici l'expression « *discourse move* » utilisée par différents auteurs (ex : Clark & Sampson, 2008, p. 295) en la modifiant légèrement. En première approche, nous considérons que chaque intervention d'un interlocuteur correspond à un type de mouvement argumentatif (la question se posant de savoir s'il est possible d'identifier des mouvements plus macroscopiques qui intégreraient plusieurs interventions). Ce modèle peut être précisé en intégrant les éléments qui caractérisent chaque interlocuteur et sur la base desquels il produit ses arguments : son point de vue sur la question débattue, ses connaissances, ses valeurs et ses intérêts (sur les deux côtés de la figure 10). Ce modèle n'est ni définitif ni exhaustif, mais se veut opératoire pour nous aider à déterminer et formuler les indicateurs de la qualité argumentative.

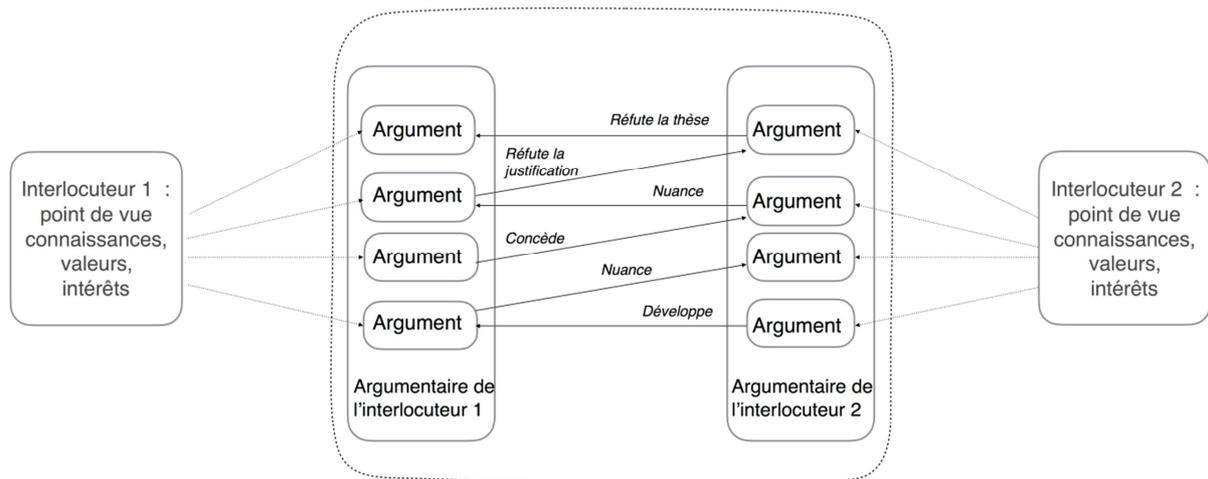


Figure 10 – Mouvements argumentatifs entre deux interlocuteurs
(schéma réalisé par Gabriel Pallarès)

Le développement d'une grille d'analyse – partie 2

Nous avons ainsi traduit ces mouvements argumentatifs en indicateurs de la qualité argumentative des productions des élèves :

- *Indicateur « concession »* : les élèves acceptent (tout ou en partie) ou non les critiques des autres ;
- *Indicateur « nuance »* : les élèves apportent ou non une nuance aux arguments des autres ;
- *Indicateur « réfutation de la thèse »* : les élèves apportent ou non une réfutation aux thèses des autres ;
- *Indicateur « réfutation de la justification »* : les élèves apportent ou non une réfutation aux justifications des autres ;
- *Indicateur « développement »* : les élèves développent ou non les idées des interlocuteurs
- *Indicateur « questionnement »* : les élèves questionnent les idées des interlocuteurs.

Enfin, un indicateur supplémentaire est apparu empiriquement lors de l'analyse des données de l'année 1 :

- *Indicateur « nouvelle idée »* : les élèves introduisent ou non une nouvelle idée suscitée par la discussion mais n'ayant pas la fonction de soutenir ou critiquer directement les idées précédemment formulées.

Résultats de l'année 1 et premiers éléments de discussion

Lors de la première année du projet (2016-2017), les 10 enseignants participants à la recherche ont réalisé 16 débats avec 259 élèves (6 enseignants ayant réalisé un débat pour chaque demi-groupe de leur classe). Pour des raisons pratiques, nous avons choisi d'analyser 10 débats (1 par enseignant) impliquant 167 élèves. Les productions des élèves ont été codées par Gabriel Pallarès suivant la grille d'analyse décrite ci-dessus. Les productions pour lesquelles le codage de certains éléments n'était pas évident ont été discutées à trois (par Gabriel Pallarès, Valérie Munier et moi-même). Je présente ici les principaux résultats de cette analyse et des premiers éléments de discussion (que nous affinons actuellement).

Degré de problématisation

Lors de ces 10 débats, 1104 interventions ont été produites par les élèves, dont

- 86% d'interventions à propos du TSS associé au texte et 14% d'interventions hors sujets et pouvant être considérées comme des bavardages périphériques ;
- soit, en moyenne, 95 interventions à propos du thème par débat (variable entre 20 et >220 selon le débat), pour un temps de débat d'environ 50 minutes en moyenne.

Les élèves détournent peu l'outil numérique pour faire des bavardages hors sujet. Ils semblent entrer dans une réelle discussion du TSS.

Au niveau de l'analyse macroscopique, nous n'avons pas encore procédé à la caractérisation complète de la structure arborescente de chaque débat. Globalement, les structures arborescentes sont assez variables. Cependant, dans tous les cas, on observe une multiplicité de branches qui partent de plusieurs points du texte. Les élèves développent plusieurs discussions collectives autonomes, sans besoin que l'enseignant les relance ou les guide par des questions ou autres interventions. Ces données semblent confirmer l'hypothèse que l'absence d'une question imposée par l'enseignant permet aux élèves de se saisir ou de faire émerger du texte des questions qui les interpellent et qui peuvent faire sens pour eux. Autrement dit, le débat synchrone basé sur un texte apparaît comme un outil pertinent pour favoriser la problématisation.

Suivant Schwarz et Baker (2017, pp. 185-186), la problématisation constitue un élément essentiel de tout dispositif didactique pour faire entrer les élèves dans l'argumentation. En ce sens, dans notre recherche, nous considérons cette problématisation comme une condition nécessaire pour engager les élèves dans l'exploration argumentée de QSS.

Appréhension de la complexité et du caractère ouvert des QSS

Dans chacun des 10 débats analysés, de multiples domaines du TSS sont abordés par les élèves : dans le cas de 8 débats, entre 4 à 6 domaines différents sont présents de façon non-négligeable, c'est-à-dire dans au moins 10% des interventions ; dans le cas de 2 débats, 2 domaines différents sont présents de façon non-négligeable. Nous pouvons en conclure que le dispositif offre bien le moyen d'explorer la complexité des QSS.

Par ailleurs, seulement 3,5% des interventions font mention des incertitudes relatives aux connaissances, tandis que 15% des interventions évoquent ou spécifient un domaine de validité. Ce taux, relativement faible, traduit le fait que la prise en compte (directe ou indirecte) de ces incertitudes constitue une compétence de haut niveau. Toutefois, ce taux n'est pas négligeable, ce qui montre que cette compétence est accessible pour les élèves. Nous constatons ainsi qu'en l'absence d'un travail préalable et explicite sur les incertitudes en jeu dans le développement des sciences et des technologies, de nombreux élèves ne les prennent pas spontanément en compte. Ce constat nous a conduits à faire la proposition suivante pour l'année 2 : lors de la phase de synthèse du premier débat, les élèves doivent effectuer un travail d'identification des incertitudes dans une sélection d'échanges des débats.

L'analyse macroscopique de la dynamique des débats concernant les domaines du TSS est en cours. Un extrait de la structure arborescente d'un débat analysé est donné dans la figure 11. Cette structure reprend l'arborescence des interventions des élèves générée par le logiciel et intègre, pour chaque intervention, la donnée des domaines du TSS qui sont abordés.

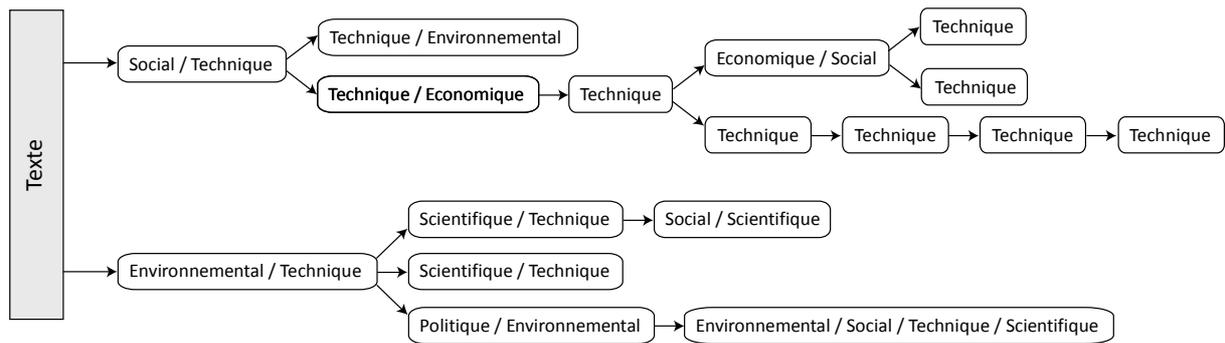


Figure 11 – Extrait de la structure arborescente d'un débat
Chaque bulle représente une intervention avec les domaines du TSS qui sont abordés.

L'analyse de cet extrait permet de mettre en évidence le fait que de nouveaux domaines du TSS étudié peuvent émerger au sein des branches, que cela soit en réagissant au texte ou à l'intervention d'un autre élève. Nous pouvons en conclure que le texte, lorsqu'il est intégré dans la plateforme de débat, offre des points de départ multiples permettant aux élèves de discuter collectivement et en parallèle les multiples domaines des QSS. Un outil de débat numérique basé sur un texte rend ainsi possible une interaction « collaborative » (Schwarz et Baker, 2017, chap. 5) entre les élèves pour explorer les QSS dans leur complexité.

Il convient de remarquer que les élèves n'ont pas forcément conscience de la multiplicité de ces domaines des QSS lorsqu'ils débattent. Il est tout à fait possible que leur attention reste focalisée sur les idées débattues sans que ce point devienne manifeste. À cet égard, la synthèse réflexive, rendue possible par la restitution écrite du débat, offre aux élèves un moyen de prendre du recul, d'avoir une vision d'ensemble sur le débat et, grâce au guidage de l'enseignant (qui demande un travail d'identification des domaines), de prendre conscience des multiples domaines des QSS.

Sur le plan méthodologique, nous pourrions affiner notre analyse en cherchant à différencier les niveaux d'appréhension de la complexité mentionnés plus haut (Morin et al., 2014). Pour ce faire, des critères adaptés sont encore à déterminer.

Qualité de l'argumentation

Concernant la qualité de l'argumentation des élèves lors des débats, globalement (pour l'ensemble des débats), il ressort que :

- 60% d'interventions sont justifiées (dont : 57% avec 1 justification, 25% avec 2 justifications et 17% avec 3 justifications ou plus) ;
- 56% des interventions mobilisant des connaissances contiennent des connaissances correctes.

Concernant les différents mouvements argumentatifs, nous obtenons les taux suivants. À noter qu'une même intervention peut comporter plusieurs mouvements argumentatifs (ex : une nuance et une réfutation de la thèse d'autrui) :

- 10% d'interventions contenant une concession ;
- 15% une nuance ;
- 26% une réfutation de la thèse d'autrui ;
- 14% une réfutation de la justification d'autrui ;
- 10% un questionnement des idées d'autrui ;
- 37% un développement des idées d'autrui.

Le faible taux d'interventions avec une concession, une nuance, une réfutation ou un questionnement des idées d'autrui peut s'expliquer en partie par le fait que ces mouvements argumentatifs requièrent des compétences d'un plus haut niveau : elles exigent de prendre en compte les idées d'autrui et de pouvoir porter dessus un regard critique.

Cependant, c'est aussi le taux d'interventions justifiées qui peut paraître insuffisant pour des élèves du lycée. Cette qualité de l'argumentation relativement faible conforte l'idée qu'une phase de synthèse réflexive présente un grand intérêt : pour que les élèves prennent conscience des défauts de leur argumentation, pour discuter ce qu'est une affirmation « justifiée » et ainsi potentiellement stimuler une meilleure argumentation dans des situations futures de débat.

Le taux d'interventions mobilisant des connaissances incorrectes est relativement élevé. Cela soulève la question des supports qui peuvent aider les élèves à mobiliser des connaissances correctes et, plus généralement, qui les incitent à mobiliser des connaissances pour alimenter leur argumentation. Le fait d'avoir réalisé des phases de préparation préalablement au débat n'apparaît pas suffisant. Ce constat nous a amenés à concevoir un outil didactique nouveau mis en place l'année 2 : le « carnet de bord » individuel des élèves qu'ils renseignent au cours des séances de préparation en y inscrivant les éléments qu'ils jugent intéressants et qui pourraient être utiles pour débattre sur ce thème (définitions, connaissances, points de vue argumentés).

Par ailleurs, on constate également une certaine variabilité des résultats en fonction des textes débattus. En particulier, la proportion d'interventions présentant une nuance est tendanciellement plus grande lorsque les textes sont nuancés plutôt que fortement positionnés (la comparaison entre deux débats donne par exemple : environ 20% de nuances avec un texte nuancé et 8% de nuances avec un texte fortement positionné). S'agissant de l'exploration de la complexité des QSS pouvant être associées au TSS, certains domaines qui semblent pourtant importants ne sont pas abordés par les élèves lorsqu'ils sont absents du texte à débattre (par exemple : le domaine de la santé n'est quasiment pas abordé dans un débat sur la voiture électrique avec un texte à débattre qui lui non plus n'aborde pas ce domaine).

Concernant l'évolution de la qualité de l'argumentation des élèves entre le pré-test et le post-test, nous n'observons pas de différence significative. Un biais méthodologique pourrait expliquer l'absence apparente d'un impact positif : d'après le témoignage des enseignants, les élèves ont manifesté un sentiment de lassitude à répéter le même test (pré-test et post-test identique l'année 1) à la fin d'une séquence parfois longue. Un autre élément d'explication est que l'évolution des compétences argumentatives, d'après d'autres études empiriques (Kuhn et al., 2016), est généralement lente et progressive. Si le dispositif didactique a eu un impact positif faible, celui-ci a peut-être été masqué par l'effet de lassitude. Ceci nous conduit à modifier notre dispositif didactique et notre méthodologie de recueil des données pour l'année 2 : sur le plan didactique, en réalisant 2 séquences (avec 2 débats et 2 synthèses réflexives) par classe durant l'année scolaire ; sur le plan méthodologique, en soumettant aux élèves un post-test qui inclut leurs réponses au pré-test (voir tableau 7 ci-dessus).

L'analyse et la discussion des résultats de l'année 1 présentée ici doit encore être affinée. Sur le plan méthodologique, notre grille d'analyse mérite d'être encore perfectionnée afin de mieux faire « parler » nos données. Contrairement à Kuhn et al. (2016), nous ne voulons pas évaluer la qualité argumentative en distinguant les mouvements argumentatifs qui

portent sur sa propre thèse (qui seraient moins exigeants) de ceux qui portent sur la thèse d'autrui (qui seraient plus exigeants). En effet, parmi les mouvements argumentatifs portant sur sa propre thèse, certains peuvent être d'un haut niveau d'exigence (par exemple : avec 2 ou 3 justifications ou avec la mention d'incertitudes ou du domaine de validité) ; à l'inverse, certains mouvements argumentatifs portant sur la thèse d'autrui peuvent être d'une qualité moindre (par exemple : lorsqu'il n'y a pas de justification ou si celle-ci est invalide). Il s'agit de réfléchir à une manière de combiner et hiérarchiser les catégories de codage. Une première piste consiste à combiner le critère « justifié/non justifié » avec les différents mouvements argumentatifs : par exemple, en distinguant une réfutation justifiée d'une réfutation non justifiée.

5.6 Projet de recherche sur le rôle de l'épistémologie personnelle et de la métacognition

L'épistémologie personnelle et la métacognition dans le contexte de l'argumentation

L'étude décrite ci-dessus vise à développer un dispositif didactique innovant centré sur un débat numérique et à étudier son impact sur l'argumentation des élèves sur des QSS. De façon complémentaire, nous avons amorcé en octobre 2017 un second projet de recherche visant à étudier les processus d'apprentissage des compétences argumentatives qui sont à l'œuvre chez les élèves dans le contexte des expérimentations du premier projet. Ce second projet est associé au travail de thèse de Kévin de Checchi, qui a une double formation en psychologie cognitive et en didactique des sciences. Pour encadrer ce travail et mener ce projet, je me suis associé à Valérie Tartas (CLLE, Université Toulouse Jean Jaurès), professeur en psychologie du développement cognitif et spécialiste de l'apprentissage de l'argumentation. L'entrée que nous avons choisie pour l'étude des processus d'apprentissage des compétences argumentatives est double : par l'étude de l'épistémologie personnelle des élèves et de leurs activités métacognitives liées à l'argumentation.

En première approche, l'épistémologie personnelle peut-être définie comme l'ensemble des représentations d'un individu à propos de la connaissance et des processus par lesquels on connaît (« knowing ») (voir les différentes définitions dans Hofer, 2004, p. 43). Il convient de distinguer l'épistémologie personnelle, qui porte sur la connaissance en général (au sens d'« *epistemology* » dans la littérature anglo-saxonne), de la vision de la « nature de la science » (ou suivant notre expression, « vision des sciences »), qui porte spécifiquement sur les connaissances scientifiques (voir section 4.5). Plusieurs études tendent à montrer que l'épistémologie personnelle d'un élève (ou d'un adulte) exerce une influence sur l'argumentation qu'il développe (Mason & Scirica, 2006, Weinstock et al., 2006, Nussbaum et al., 2008). Par exemple, un élève qui considère que tout le monde a le droit d'avoir sa propre opinion, sans que celle-ci soit contestable, sera moins enclin à être critique sur les arguments des autres et à interagir avec eux (Nussbaum et al., 2008). D'après Schwarz et Baker (2017, p. 215), les recherches sur les liens entre épistémologie personnelle et argumentation doivent encore être développées, notamment en considérant la pratique argumentative dans le contexte de débats et non uniquement dans celui d'essais écrits ou d'entretiens. Le projet AREN peut offrir le terrain d'une telle étude. En outre, il paraît d'autant plus intéressant d'étudier l'épistémologie personnelle des élèves concernant des QSS dans la mesure où ces dernières mettent en jeu différents types de connaissances (scientifiques, sociales, économiques, environnementales...), des valeurs et des incertitudes.

En première approche également, la métacognition peut être définie comme une cognition qui est réflexive, guide et/ou régule une cognition de premier niveau (Kuhn, 2000, p. 178). Notre intérêt initial pour cet objet d'étude a été suscité par le fait que notre

dispositif didactique centré sur un débat numérique comporte une phase de synthèse réflexive : lors de cette synthèse, nous cherchons à stimuler chez les élèves une activité métacognitive sur leur propre argumentation, dans l'idée d'améliorer leurs compétences argumentatives. En quoi consiste précisément cette activité métacognitive (à supposer qu'il y ait telle activité) et comment est-elle liée à l'argumentation ? L'étude des liens entre activité métacognitive et argumentation constitue un second angle de recherche pour mieux comprendre les processus d'apprentissage de l'argumentation dans notre dispositif didactique.

Par ailleurs, certains auteurs modélisent l'épistémologie personnelle comme un « processus métacognitif » (Hofer, 2004) ou comme étant en interaction avec la métacognition (Muis, 2007). Autrement dit, l'épistémologie personnelle, la métacognition et l'argumentation sont trois objets d'études qu'il conviendrait d'étudier ensemble pour mieux comprendre les processus d'apprentissage de l'argumentation.

Questions de recherche spécifiques

Les questions de recherches que nous explorons dans ce projet de recherche peuvent être (provisoirement) formulées ainsi :

- *Épistémologie personnelle et argumentation* : Quels sont les liens entre l'épistémologie personnelle des élèves et la qualité de leur argumentation ? En particulier : l'évolution de l'épistémologie personnelle des élèves s'accompagne-t-elle d'une évolution de leurs compétences argumentatives ? Y a-t-il une relation d'influence dans un sens ou un autre ?
- *Métacognition et argumentation* : Quels sont les liens entre l'activité métacognitive des élèves et la qualité de leur argumentation ? En particulier : un dispositif didactique qui favorise une activité métacognitive chez les élèves permet-il de développer leurs compétences argumentatives ?
- *Épistémologie personnelle, métacognition et argumentation* : Quels sont les liens entre l'épistémologie personnelle des élèves et leur activité métacognitive dans le contexte de l'argumentation ?

Pour explorer ces questions, nous proposons de mener une recherche à la fois empirique et théorique : il s'agit, d'une part, de recueillir des données qui vont permettre d'éclairer les liens entre ces trois objets d'étude (l'épistémologie personnelle, la métacognition et l'argumentation) et, d'autre part, de modéliser ces liens – ces deux approches s'alimentant mutuellement.

Éléments empiriques et théoriques issus de la littérature

Sur les deux plans empiriques et théoriques, nous pouvons nous appuyer sur un ensemble de recherches portant sur les liens entre l'épistémologie personnelle, la métacognition et l'argumentation. Je vais présenter ici des premiers éléments tirés de la littérature (l'analyse de la littérature étant en cours).

Dans une approche développementale, Kuhn et ses collègues (2000) ont proposé un modèle de l'évolution de l'épistémologie personnelle des individus en trois étapes (auxquelles s'ajoute une étape avant 4 ans que nous n'évoquerons pas ici) :

- *Niveau absolutiste* : la connaissance est une entité objective, indépendante de tout sujet, qui peut être acquise ou non ; par conséquent, cela n'a pas de sens de dire que la connaissance, elle-même, est incertaine ; si différentes personnes font des assertions contradictoires sur le monde, ce n'est qu'une question d'ignorance ; une

seule assertion est vraie en vertu de sa correspondance avec le monde extérieur ; cette connaissance vient d'une autorité experte ;

- *Niveau multipliste* : la connaissance est la construction d'un ou plusieurs sujets ; par conséquent, elle peut être incertaine ; les assertions contradictoires sur le monde émises par différentes personnes sont des expressions de leurs opinions ; chacun a le droit d'avoir une opinion différente sur le monde ; autrement dit, les différentes opinions sont autant légitimes les unes que les autres ;
- *Niveau évaluatiste* : similaire au niveau multipliste, à la différence importante qu'il existe des critères (c'est-à-dire des arguments et des preuves) pour évaluer qu'une opinion a plus de mérite qu'une autre.

L'étude empirique menée par Kuhn et al. (2000) révèle que le développement d'un individu suivant ces 3 étapes dépend du domaine (goût personnel, esthétique, monde social ou monde physique), mais aussi étonnamment qu'environ une moitié des adultes reste au niveau multipliste, quel que soit le domaine considéré.

Plusieurs études empiriques ont mis en évidence des liens entre l'épistémologie personnelle, suivant ces trois niveaux, et l'argumentation : d'après l'étude de Mason et Scirica (2006), les évaluatistes développent des arguments, contre-arguments et réfutations (de contre-arguments) sur des QSS de plus grande qualité que les multiplistes ; Nussbaum et al., 2008 ont montré que les multiplistes interagissent de façon moins critique avec les autres sur des problèmes de physique que les évaluatistes, notamment en réagissant moins aux incohérences ou aux conceptions erronées des autres ; dans une étude sur les *fallacies*, Weinstock et al. (2006) ont trouvé que les évaluatistes repèrent plus facilement les arguments non valides de type « *ad ignorantiam* » (suivant lesquels une affirmation est vraie s'il n'a pas été montré qu'elle était fausse) que les absolutistes et les multiplistes.

Ces études donnent des premières indications sur les liens possibles entre épistémologie personnelle et argumentation. Cependant, elles reposent sur une catégorisation de l'épistémologie personnelle qui reste assez grossière, dans la mesure où elle ne distingue que trois grandes catégories. Certes, il est admis que les individus puissent être à un niveau d'épistémologie personnelle différent selon les domaines. Mais chaque niveau correspond à une catégorie générale qui englobe tous les aspects de la connaissance et de la construction ou acquisition de connaissances. Or, on pourrait imaginer, d'une part, que la conception épistémologique d'un individu soit spécifique en fonction de l'aspect de la connaissance ou de la construction ou acquisition de connaissances qui est considéré et, d'autre part, qu'il y ait une grande diversité de profils épistémologiques, c'est-à-dire de combinaisons de conceptions différentes pour les différents aspects considérés (ce qui renvoie à la critique émise concernant la vision des sciences des enseignants, voir section 4.7). C'est en ce sens que Schommer (1990, cité par Hofer, 2004, p. 45) a proposé que l'épistémologie personnelle soit décrite comme une collection de croyances, plus ou moins indépendantes, concernant la connaissance et la construction ou acquisition de connaissances. Hofer (2004, p. 45) a repris cette idée mais en soutenant que ces croyances sont assemblées par un individu de façon cohérente, de sorte à former une « théorie épistémologique ». Comme le concède Hofer elle-même, la question de l'existence d'une telle cohérence entre les représentations d'un individu à propos de différents aspects épistémologiques reste ouverte et mérite encore d'être explorée.

Indépendamment de cette question de la cohérence, Hofer (2004, pp. 46 et 49) a proposé une grille pour distinguer quatre points d'épistémologie personnelle sur lesquels les représentations d'un individu peuvent être variables, ce qui permet d'affiner la

catégorisation de Kuhn et ses collègues. Deux points concernent la « nature de la connaissance » :

- *La certitude de la connaissance* : croyance que la connaissance est certaine *ou* provisoire et évolutive ;
- *La simplicité de la connaissance* : croyance que la connaissance est une simple collection de faits *ou* constituée de concepts interconnectés, relatifs contingents et contextuels.

Deux points concernent la « nature des processus par lesquels on connaît » (« *nature of knowing* ») :

- *La source de la connaissance* : croyance que la connaissance réside en dehors de moi et qu'elle m'est transmise par des autorités extérieures *ou* que je suis moi-même un constructeur actif de signification ;
- *La justification de la connaissance* : croyances concernant les critères qui permettent de justifier qu'une assertion exprime une connaissance (l'observation, l'autorité, ce que je ressens comme juste, l'usage de règles caractéristiques de démarches scientifiques, l'évaluation d'experts...).

Hofer (2004, p. 44) ne considère pas simplement que l'épistémologie personnelle constitue une théorie formée de cet ensemble de croyances. Elle propose de décrire l'« épistémologie personnelle comme un processus métacognitif ». Or, nous voyons dans cette formulation un problème conceptuel : une *croyance*, une *représentation* ou une *théorie* ne sont pas de même nature qu'un *processus*. Selon nous, pour donner sens à l'idée de Hofer, il conviendrait de concevoir la métacognition en un sens plus large, c'est-à-dire en ne définissant pas la métacognition simplement en termes de processus, mais comme incluant aussi des croyances ou des représentations.

En ce sens, certains auteurs (Brown et al., 1983, cité par Muis, 2007, p. 175) définissent la métacognition comme ayant deux composantes : une connaissance sur la cognition et la régulation de la cognition (la connaissance sur la cognition faisant référence ici à l'information dont dispose un individu sur sa propre cognition et non sur la connaissance en général). Soulignons que cette manière de définir la métacognition n'est pas consensuelle. Par exemple, Mason et Santi (1994, p. 6) définissent la métacognition comme une « conscience interne ou disposition réflexive sur ce que l'on connaît, pourquoi, comment et quand on le connaît » et la distinguent de l'auto-régulation de la cognition qui peut en résulter.

Dans notre recherche, dans un souci de clarté conceptuelle, nous proposons distinguer ce qui est de l'ordre des *représentations* d'un individu et ce qui est de l'ordre de ses *activités* cognitives (ou métacognitives). Par « représentation », on peut entendre une image mentale qui est présente à l'esprit (Clément et al., 1994, p. 307, Lalande, 1997, p. 921), tandis qu'une « activité » cognitive (ou métacognitive) renvoie à ce que fait mentalement un individu, ou autrement dit à des opérations mentales qu'il effectue (les termes « activité » et « processus » pouvant être rapprochés). Suivant ces acceptions, une représentation résulte certes d'une activité cognitive, mais elle s'en distingue ; elle en est le produit. Si l'on adopte ces définitions, l'activité métacognitive ne peut pas inclure l'épistémologie personnelle (contrairement à ce que suppose le modèle de Hofer, 2004), ce qui ne signifie pas que l'activité métacognitive et l'épistémologie personnelle n'entretiennent pas des liens étroits

(comme le soutient Muis, 2007). L'un des objectifs de notre recherche est justement de préciser ces liens, tant par une modélisation théorique que par des données empiriques.

Méthodologie de recueil et d'analyse des données

Dans ce projet de recherche, notre approche est qualitative. Nous proposons de nous focaliser sur un échantillon restreint d'élèves : de l'ordre de 2 groupes de 4 élèves venant d'une classe différente par année. Trois types de données sont recueillis (par Kévin de Checchi) :

- Les productions écrites des élèves au cours des débats numériques ;
- Captations vidéo des activités des élèves lors des phases de synthèse réflexive avec transcription des échanges oraux ;
- Entretiens semi-directifs avant et après les deux séances {débat numérique + synthèse réflexive}.

Ces trois types de données sont analysés chacun au regard d'un objet d'étude différent : dans les productions écrites lors du débat, nous analysons l'argumentation produites par les élèves ; dans les échanges oraux lors des synthèses, nous inférons leur activité métacognitive à partir des phrases énoncées ; et dans les entretiens, nous explorons leur épistémologie personnelle à partir de leurs réponses à des questions portant sur les « avis » et les « connaissances » liés à différentes QSS.

Lors de la première année du projet (2017-2018), nous élaborons une première grille d'analyse de ces trois types de données. Concernant l'argumentation, nous pouvons prendre pour point de départ la grille d'analyse présentée plus haut (section 5.5) et l'adapter au contexte de ce projet. S'agissant de l'activité métacognitive, nous confrontons actuellement les premières données à différentes grilles proposées dans la littérature : en particulier, celle de Barzilai et Zohar (2016). Enfin, pour ce qui est de l'épistémologie personnelle, nous testons la grille de Hofer (2004) décrite ci-dessus.

Ces grilles d'analyse sur l'activité cognitive et l'épistémologie personnelle n'ont pas été développées spécifiquement en lien avec l'argumentation. Il convient donc de les adapter et/ou de les développer. L'activité cognitive qui nous intéresse dans notre projet correspond à une activité de production d'arguments. Par conséquent, l'activité métacognitive pourrait être décrite comme une activité *à propos* de cette activité de production d'arguments. À cet égard, en nous inspirant de Mason et Santi (1994) ainsi que de Barzilai et Zohar (2016), nous pourrions distinguer différents types de phrases produites par les élèves qui traduisent une activité métacognitive et tenter de déterminer leurs fonctions respectives. À titre de proposition provisoire, une distinction pourrait être opérée entre :

- (1) Les phrases sur les arguments eux-mêmes, qui ont pour fonction de participer à l'argumentation (ex : « Ma thèse s'appuie sur une étude scientifique », « Tu affirmes cela sans le justifier ») ;
- (2) Les phrases sur l'état épistémique des sujets qui argumentent, qui ont pour fonction de faire le point sur leurs connaissances et croyances afin d'impulser ou stopper la production de nouveaux arguments (ex : « Je ne suis pas sûr que... », « Tu penses que... ») ;
- (3) Les phrases sur l'activité du sujet qui argumente, qui ont pour fonction de réguler ou guider l'activité de production d'arguments (ex : « On devrait vérifier en cherchant plus d'informations à ce sujet », « Pourrais-tu préciser ? »).

Concernant la grille d'analyse de Hofer (2004), nous pouvons envisager de la faire évoluer en nous inspirant des points d'épistémologie mis en évidence dans la littérature sur la vision des sciences (voir partie 4). Nous pourrions inclure des points portant sur des objets susceptibles d'être mobilisés dans une argumentation (en particulier sur des QSS), tels que :

- *Les données* : conçues comme neutres ou chargées de théorie ;
- *Les modèles* : distingués de la réalité empirique ou considérés de façon transparente et comme isomorphes à la réalité empirique.

Deux autres questions méthodologiques se posent dans cette première année du projet. Premièrement, devons-nous nous limiter à l'étude de l'épistémologie personnelle *déclarée* des élèves ou convient-il aussi d'inférer l'épistémologie personnelle *en action* dans l'argumentation ou dans la phase de synthèse réflexive sur les arguments ? Deuxièmement, pouvons-nous identifier une activité métacognitive au cours du débat ? Les choix à opérer dépendent du modèle de l'épistémologie personnelle et de l'activité métacognitive que nous allons développer.

5.7 Perspectives dans le cadre du projet AREN

Étude longitudinale

Dans les deux prochaines années du projet AREN (2018-2020), nous envisageons de mener une étude longitudinale : en étudiant l'évolution des compétences argumentatives des élèves d'une même classe pendant deux années au cours desquelles 4 séquences {phase préparatoire + débat numérique + synthèse réflexive} sont mises en œuvre. Concrètement, cela pourrait être réalisé avec une classe de série littéraire (1L puis TL), qui subit un éclatement moindre après l'année de 1^{ère}, et dans deux à quatre disciplines différentes. Sur le plan du dispositif didactique, nous pourrions envisager une progression concernant les points étudiés lors des 4 phases de synthèse réflexive. L'évolution des compétences argumentatives des élèves de la classe testée pourrait être comparée avec celles des élèves de plusieurs autres classes contrôles (de mêmes niveaux scolaires, où le dispositif étudié n'est pas mis en œuvre), afin d'isoler la variable liée à la maturation intellectuelle.

Étude sur la reformulation

Une étude plus spécifique sur la reformulation est menée dans le cadre du projet AREN. En voici les premiers éléments. La reformulation, comme nous l'avons indiqué plus haut, peut être considérée comme faisant partie de l'activité d'argumentation, dans la mesure où elle participe de la prise en compte et de l'interprétation des idées des autres, qu'il s'agit ensuite d'évaluer dans une perspective critique. La plateforme AREN, par la demande de reformulation, met l'accent sur cette activité argumentative.

Les élèves se saisissent-ils de cette fonctionnalité de reformulation ? Parviennent-ils à proposer une reformulation de qualité ? Pour étudier ces questions, avec Gabriel Pallarès et Valérie Munier, nous avons élaboré une première grille d'évaluation de la qualité de la reformulation en termes d'adéquation sémantique et de transformation syntaxique. Nous avons ainsi obtenu les résultats suivants pour les 10 débats analysés l'année 1 :

- 65% d'interventions avec reformulation (23% à 100% selon le débat) ;
- En cas de reformulation : 72% avec une adéquation sémantique moyenne ou élevée ;
- 61% avec une transformation syntaxique moyenne ou élevée ;
- Détournements du champ « reformulation » : 29% sont des commentaires, 24% sont des prises de position par rapport au passage sélectionné.

La demande de reformulation favorise-t-elle la prise en compte des arguments des autres et le développement d'une argumentation de plus grande qualité ? En étudiant la corrélation entre la qualité de la reformulation et la qualité de l'argumentation (évaluée par la présence ou non de nuances, concessions, réfutations et justifications), il ressort en première analyse, lors de l'année 1, une absence de corrélation. Ce résultat négatif pourrait s'expliquer par l'idée que la reformulation et l'argumentation sont deux tâches complexes et exigeantes d'un point de vue cognitif, de sorte que les élèves ne sont pas facilement en capacité de produire à la fois une reformulation et une argumentation de qualité lors d'une même intervention dans le débat. Le travail de reformulation peut-il produire un effet bénéfique sur l'argumentation sous certaines conditions ? Par exemple, pour obtenir un effet bénéfique, est-il nécessaire que les élèves aient des compétences argumentatives minimales et/ou aient déjà une certaine pratique de l'argumentation. Afin d'explorer cette piste, nous allons analyser l'évolution de la corrélation entre la qualité de la reformulation et la qualité de l'argumentation au cours de l'année 2 lors de laquelle 2 débats sont mis en œuvre dans chaque classe.

Cette étude spécifique sur la reformulation mérite d'être développée sur le plan empirique, mais aussi sur le plan théorique, afin de chercher à mieux comprendre le statut et le rôle de la reformulation dans le processus de l'argumentation. Cette question théorique pourrait être explorée en lien avec la question de l'intercompréhension ou de l'intersubjectivité (voir section 2.8).

Étude exploratoire avec des élèves ayant des troubles psychiques ou du comportement

Enfin, toujours dans le cadre du projet AREN, nous avons amorcé en 2018 une étude exploratoire ciblée sur un public d'élèves adolescents en ITEP. Ces élèves, sans déficience intellectuelle mais avec des troubles psychiques ou du comportement, font face à des difficultés communicationnelles importantes. L'objectif de cette étude est d'explorer l'apport possible d'une plateforme numérique de débat comme outil de médiation entre l'élève et les autres, ainsi qu'entre l'élève et les savoirs. Une telle plateforme permet-elle de surmonter certains des obstacles à la communication qui se manifestent dans un rapport direct de face-à-face avec les autres, comme ceux liés aux émotions ? Favorise-t-elle l'expression des élèves et l'écoute des autres élèves, voire leur entrée dans un échange argumenté ? À travers les textes ou images qu'elle peut intégrer comme support de discussion, la plateforme offre-t-elle également un moyen pour les élèves de s'ouvrir au monde social ?

Ce projet a impliqué initialement Sylvie Canat et Godefroy Lansade (LIRDEF), chercheurs spécialisés sur les questions d'accompagnement et d'éducation d'enfants avec troubles du comportement, Kevin de Checchi et moi-même. En 2018, nous avons recruté Capucine Huet, éducatrice spécialisée, comme stagiaire de recherche (en M2), pour une demi-année. Elle a mené une première étude dans une classe d'ITEP avec des élèves partiellement en inclusion scolaire : avec une première phase d'observation, puis une phase d'expérimentation d'un dispositif didactique adapté centré sur la plateforme AREN. Capucine Huet a obtenu un contrat doctoral pour débiter une thèse en octobre 2018 sous la direction Sylvie Canat et moi-même.

6. Conclusion

Le parcours scientifique présenté dans cette note de synthèse se caractérise par deux axes de recherche : le premier s'inscrit dans le domaine de l'épistémologie et porte sur les fondements de la physique ; le second s'inscrit dans le domaine de la didactique de la physique et de l'éducation à la citoyenneté basée sur l'étude de QSS. Au-delà des différences entre les objets d'étude, on peut percevoir un lien fort entre ces deux axes. Il ressort que les réflexions épistémologiques menées dans mes premières recherches nourrissent l'ensemble de mes recherches ultérieures sur des questions d'enseignement et d'apprentissage en sciences. En outre, l'approche pragmatiste développée pour interpréter la mécanique quantique se retrouve en arrière-plan de plusieurs études réalisées en didactique de la physique, en particulier de celle sur l'enseignement de l'énergie au lycée. Cette dernière se base en effet sur une exploration préalable de l'histoire et de l'épistémologie de ce concept visant notamment à mettre en lumière la fonction pragmatique qu'il remplit en physique.

Les diverses recherches présentées dans cette note de synthèse offrent l'occasion de préciser et d'illustrer les multiples contributions possibles de l'épistémologie et de l'histoire des sciences à la didactique des sciences et en particulier à la didactique de la physique. Dans un ouvrage intitulé « Épistémologie et didactique », coordonné par Viviane Durand-Guerrier, Valérie Munier et moi-même (Bächtold, Durand-Guerrier & Munier, 2017), nous avons distingué deux types de contributions possibles, qui portent respectivement sur l'apprentissage et l'enseignement de *connaissances scientifiques spécifiques* et plus généralement sur les *méthodes d'enseignement* des sciences. Celles-ci peuvent être formulées en ces termes :

- Des études historiques et épistémologiques sur la genèse, le statut et la fonction de connaissances scientifiques spécifiques peuvent être utiles pour mieux comprendre les obstacles et les étapes possibles de leur apprentissage par des élèves et, corrélativement, pour développer des progressions et des stratégies d'enseignement de ces connaissances ;
- Les éclairages épistémologiques sur les pratiques scientifiques et la genèse, le statut et la fonction des connaissances scientifiques en général permettent de discuter et/ou développer les méthodes d'enseignement des sciences, comme en témoignent la conception et la promotion à l'échelle internationale de l'enseignement des sciences par démarches d'investigation (IBSE).

La recherche que nous avons menée sur l'enseignement de l'énergie (partie 3) apporte une illustration au premier point, tandis que celle sur les sources théoriques de l'IBSE (sections 4.1 à 4.4) a permis de préciser le second point en mettant en lumière les éclairages effectifs et possibles de l'épistémologie pour justifier différents aspects de l'IBSE.

En outre, la recherche sur l'énergie nous a conduits à élaborer une séquence d'enseignement centrée sur une expérience historique (celle de Joule) qui s'est révélé être un support riche pour aider les élèves à mieux comprendre le concept d'énergie. Cette recherche met ainsi en évidence un troisième type de contribution de l'épistémologie ou plus exactement de l'histoire des sciences pour la didactique de la physique :

- L'histoire des sciences constitue un réservoir d'expériences potentiellement très riches qui peuvent être étudiées en classe (en précisant le contexte historique dans lequel elles ont été réalisées), voire reproduites par l'enseignant et/ou les élèves, afin d'aider

ces derniers à saisir les enjeux de l'émergence des nouvelles connaissances scientifiques et ainsi à mieux comprendre leur signification.

Par ailleurs, j'ai présenté une recherche en cours qui s'inscrit dans le domaine de NOS (« *Nature of Science* ») et portant plus spécifiquement sur la vision des sciences des enseignants et des liens possibles de celle-ci avec leurs pratiques d'enseignement des sciences (sections 4.5 à 4.8). Cette recherche s'ancre dans une réflexion épistémologique dont la fonction peut être décrite en ces termes :

- Les débats épistémologiques du XXe siècle (ou plus récents) constituent des sources privilégiées pour penser les enjeux éducatifs associés au développement de la vision des élèves sur les sciences (sur NOS au sens large), mais aussi pour discuter les points d'épistémologie qui peuvent être traités en classe avec les élèves et/ou évalués au niveau des enseignants et des élèves.

Enfin, la recherche ayant pour objet l'argumentation sur des questions socio-scientifiques (partie 5) permet d'entrevoir un cinquième type de contribution :

- L'épistémologie permet de mettre en lumière les caractéristiques des questions socio-scientifiques (QSS) qui peuvent faire l'objet de débats en classe.

Plusieurs chercheurs ont ainsi fait ressortir que les QSS sont à la fois complexes et ouvertes, notamment parce qu'elles mettent en jeu des connaissances qui relèvent de multiples domaines et qui peuvent être marquées par des incertitudes. À noter qu'une caractérisation plus fine des QSS sur le plan épistémologique est possible, par exemple en s'appuyant sur les travaux de sociologues à ce sujet (Lemieux, 2007, Chateauraynaud, Debaz & Fintz, 2013). Celle-ci pourrait aider, en particulier, à mieux cerner le potentiel du traitement en classe de QSS pour développer la vision des sciences des élèves (Karian & Zeidler, 2017) ou à mieux situer les éléments épistémologiques auxquels les élèves font ou non appel dans leur argumentation sur des QSS (Albe & Gobert, 2010).

Ayant distingué et précisé diverses contributions de l'épistémologie et de l'histoire des sciences pour la didactique de la physique, on peut se poser la question suivante : les relations entre ces domaines sont-elles à sens unique ? La didactique de la physique n'apporte-t-elle pas en retour des contributions à l'épistémologie et à l'histoire des sciences ? Si l'on considère la littérature en épistémologie, la réponse semble être négative : il n'y a pas (ou très peu) de trace de didactique de la physique (ou plus largement, de didactique des sciences) dans les écrits des épistémologues.

Cependant, deux pistes de telles contributions pourraient être envisagées. La première est suggérée par l'approche « dialectique » développée par de Hosson (2011, p. 31) entre « deux enquêtes, l'une, centrée sur les raisonnements des élèves, l'autre tournée vers l'évolution des idées dans l'histoire des sciences ». S'inspirant de travaux antérieurs de Dorier en didactique des mathématiques, de Hosson (*ibid.*) explique que « 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 ». Suivant cette approche, l'enquête menée en didactique des sciences conditionne l'enquête menée en histoire des sciences. Cette dernière étant instrumentalisée pour développer une stratégie

d'enseignement, on pourrait penser de prime abord qu'elle n'a que peu d'intérêt pour les historiens des sciences ou les épistémologues. Cependant, cette perspective d'une exploitation pour l'enseignement conduit les didacticiens des sciences à aborder l'histoire des sciences et l'épistémologie de façon originale. D'une part, avec la perspective de penser la progression et l'organisation des connaissances à enseigner, ils portent une attention particulière à la manière dont les connaissances scientifiques se sont développées (avec des continuités et/ou des ruptures) et organisées dans l'histoire des sciences. D'autre part, les didacticiens des sciences ont pour perspective de mieux comprendre les processus d'apprentissage de connaissances par des élèves sur la base de leurs conceptions initiales ; à cet égard, ils étudient l'histoire des sciences et l'épistémologie en s'intéressant plus spécifiquement à la manière dont les scientifiques ont pu appréhender la signification de nouvelles connaissances sur la base de leurs connaissances préalables. Il n'est pas question ici de défendre l'hypothèse onto-phylogénétique de Piaget selon laquelle il existerait un parallélisme fort entre l'évolution des connaissances scientifiques à l'échelle de l'histoire des sciences et à l'échelle d'un individu (cette hypothèse faisant l'objet de plusieurs critiques, voir section 4.2). En particulier, il ne s'agit pas de soutenir que les études des didacticiens des sciences sur les processus d'apprentissage des élèves apportent des explications sur l'évolution des connaissances dans l'histoire des sciences. L'idée suggérée ici est que les attentes ou les intérêts des didacticiens des sciences peuvent orienter les études historiques et épistémologiques sur des aspects possiblement nouveaux et pertinents pour les historiens des sciences et les épistémologues. À l'appui de cette idée, on peut mentionner les nombreuses études proprement historiques et épistémologiques, publiées dans la revue *Science & Education*, qui ont été menées dans la perspective, plus ou moins proche, de les réinvestir pour l'enseignement. Dans cette revue, on trouve par exemple tout un ensemble d'études historiques et épistémologiques sur le concept d'énergie : en particulier, sur le développement de la grandeur travail (de Berg, 1997, Kanderakis, 2014), sur les travaux de Mayer et Joule en lien avec le principe de conservation de l'énergie (Coehlo, 2009, 2014), sur le développement de la thermodynamique (Cotignola et al., 2002), sur l'émission de l'hypothèse du neutrino face à l'apparente remise en cause du principe de conservation de l'énergie (Guerra et al., 2014), sur le rapprochement opéré par Mach entre ce principe de conservation et le principe de causalité (Guzzardi, 2014) ou encore sur l'interprétation de l'énergie en termes de capacité à changer (Bunge, 2000).

Une seconde piste de contribution « en retour » qui pourrait être envisagée, concerne les processus d'élaboration, d'acquisition et d'échange de connaissances scientifiques. Avant de préciser cette idée, soulignons que l'épistémologie se nourrit déjà des apports d'autres domaines, en particulier de l'histoire des sciences et de la sociologie des sciences. Plus récemment, certains débats épistémologiques ont également été alimentés par des arguments venant du domaine de la psychologie cognitive (par exemple, la question de savoir si les données d'observation sont toujours chargées de théorie, voir Fodor, 1984, Churchland, 1988). Comme le remarquent Barberousse et ses collègues (2000, p. 197), « le transfert de connaissances [...] n'a pas lieu à sens unique » ; d'après eux, il existe des apports mutuels entre ces deux domaines, car ils traitent en partie les mêmes questions, bien que sous des angles différents : « certains problèmes sont communs à ces deux disciplines et [...] seule une approche résolument interdisciplinaire sera à même de les résoudre ». Or, cette interdisciplinarité ne gagnerait-elle pas à être étendue pour englober également la didactique des sciences ? On peut penser en effet à une possible complémentarité entre les trois domaines pour comprendre les processus d'élaboration, d'acquisition et d'échange de

connaissances scientifiques. Bien qu'ils ne soient pas abordés de la même façon, ces processus constituent bien un objet d'étude commun : très schématiquement, l'épistémologie mène une réflexion d'ordre philosophique sur ces processus à travers une discussion confrontant diverses thèses et arguments ; la psychologie cognitive étudie ces processus en développant des modèles concernant les structures ou les capacités cognitives supposées être impliquées et en réalisant des expérimentations contrôlées avec des enfants ou des adultes ; tandis que la didactique des sciences étudie ces mêmes processus, notamment en développant des stratégies d'enseignement et en les expérimentant dans des classes – ces dernières créant un contexte qui, d'un côté, s'avère difficile à contrôler, mais de l'autre, peut être considéré comme un élément constitutif des processus étudiés. La description donnée ici de ces trois approches est très rapide et donc réductrice. Cependant, elle entend suggérer l'idée d'une complémentarité. Cette dernière est sans doute autant à préciser conceptuellement qu'à développer dans les faits, par exemple en développant un dialogue entre des chercheurs des trois domaines.

L'un des projets de recherche présentés dans cette note de synthèse (associé au travail de thèse de Kévin de Checchi) offre l'opportunité de développer un tel dialogue sur un sujet précis, celui de l'élaboration collective, de l'acquisition et de l'échange de points de vue et d'arguments (mobilisant, entre autres, des connaissances scientifiques) à propos de QSS dans le cadre de débats entre lycéens (voir section 5.5). Menée en collaboration avec une chercheuse en psychologie du développement cognitif (Valérie Tartas), cette recherche se focalise sur les activités cognitives et métacognitives sous-jacentes aux processus d'apprentissage de l'argumentation ; ces activités cognitives et métacognitives sont étudiées en lien avec l'épistémologie personnelle des élèves ; tandis que les processus d'apprentissage de l'argumentation des élèves prennent place dans le cadre d'un dispositif d'enseignement (centré sur un débat numérique) faisant l'objet d'une étude didactique spécifique (associée au travail de thèse de Gabriel Pallarès et menée en équipe avec Valérie Munier, voir section 5.6). Nous entendons ainsi explorer l'argumentation suivant une approche plurielle qui relève à la fois de la didactique des sciences, de la psychologie cognitive et de l'épistémologie.

Un second projet de recherche, amorcé récemment et dont les contours doivent encore être précisés, mobilise l'épistémologie et la didactique de la physique : il vise à mieux comprendre de façon qualitative des liens possibles entre la vision des sciences des enseignants et leurs pratiques d'enseignement des sciences. Enfin, les deux autres recherches présentées dans cette note de synthèse, respectivement sur l'interprétation de la mécanique quantique (partie 2) et sur l'enseignement de l'énergie (partie 3), ouvrent également de nouvelles perspectives : l'une, ponctuelle et à une échéance proche, porte sur le Qbism face à la question de l'intersubjectivité ; l'autre, plus complexe à mettre en œuvre et à une échéance plus lointaine, consisterait à étudier le rôle respectif de la maturation cognitive des élèves et de différentes stratégies d'enseignement dans l'apprentissage de l'énergie.

Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement Bernard Calmettes et Valérie Munier pour leur relecture minutieuse de l'ensemble de la note de synthèse et leurs nombreuses propositions constructives. Je souhaite remercier également très vivement Jean-Marie Boilevin pour ses conseils sur la structuration d'ensemble et pour sa relecture d'une partie de l'écrit. Un très grand merci également à Sylvie Canat, Kévin de Checchi, Gabriel Pallarès, Véronique Pinet et Valérie Tartas pour leur relecture scrupuleuse de différentes parties et pour leurs retours très riches.

7. Références bibliographiques

- Aaronson, S., (2004). Is Quantum Mechanics an Island in Theory Space. In A. Khrennikov (ed.), *Proceedings of the Växjö Conference "Quantum Theory: Reconsideration of Foundations – 2"* (arXiv e-print, quant-ph/0402095).
- Abd-El-Khalick, F. & Lederman, N. (2000). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057-1095.
- Abd-El-Khalick, F. (2001). Embedding nature of science instruction in preservice elementary science courses: abandoning scientism, but... *Journal of Science Teacher Education*, 12(3), 215–233.
- Abd-El-Khalick, F. (2013). Teaching with and about nature of science, and science teacher knowledge domains. *Science & Education*, 22, 2087-2107.
- Agabra, J. (1985). Énergie et mouvement : représentations à partir de l'étude de jouets mobiles. *Aster*, 1, 95-113.
- Aikenhead, G. (2005). Science-based occupations and the science curriculum: Concepts of evidence. *Science Education*, 89, 242-275.
- Akerson, V. & Hanuscin, D. (2007). Teaching the nature of science through inquiry: results of a three-year professional development program. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(5), 653-680.
- Akerson, V. & Volrich, M. (2006). Teaching nature of science explicitly in a first-grade internship setting. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(4), 377-394.
- Akerson, V., Cullen, T. & Hanson, D. (2009). Fostering a community of practice through a professional development program to improve elementary teachers' views of nature of science and teaching practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(10), 1090-1113.
- Albe, V. & Gombert, M.-J (2010). Intégration scolaire d'une controverse socioscientifique contemporaine : savoirs et pratiques d'élèves pour appréhender les savoirs et pratiques de scientifiques. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 2, 103-126.
- Albe, V. (2008). When scientific knowledge, daily life experience, epistemological and social considerations intervene: students' argumentation in group discussions on a socio-scientific issue. *Research in Science Education*, 38, 67-90.
- Anderson, R. (2007). Inquiry as an organizing theme for science curricula. Dans S. Abell & N. Lederman (eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 807-830). Mahwah (New Jersey) et Londres : Lawrence Erlbaum.
- Arons, A. (1999). Development of energy concepts in introductory physics courses. *American Journal of Physics*. 67(12), 1063-1067.
- Artigue, M. (1990). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 9(3), 281-308.
- Astolfi, J.-P. & Develay, M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Atkins, P. & de Paula, J. (2010). *Physical Chemistry*. New York: Freeman.
- Bachelard, G. (1994 [1949]). *Le rationalisme appliqué*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bachelard, G. (1999 [1934]). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bachelard, G. (2004 [1938]). *La formation de l'esprit scientifique: contribution à une psychanalyse de la connaissance*. Paris: Vrin.
- Bächtold, M. (2006). An instrumentalist criticism of popper's propensities. In J. Jarvie, K. Milford & D. Miller (eds.), *Karl Popper: A Centenary Assessment, Volume III: Science and Social Science* (p. 97-104). London: Routledge.
- Bächtold, M. (2008a). Five formulations of the quantum measurement problem in the frame of the standard interpretation. *Journal for General Philosophy of Science*, 39(1), 17-33.
- Bächtold, M. (2008b). Interpreting quantum mechanics according to a pragmatist approach. *Foundations of Physics*, 38(9), 843-868.
- Bächtold, M. (2008c). Are all measurement outcomes 'classical'? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39(3), 620-633.
- Bächtold, M. (2009). *L'interprétation de la mécanique quantique, une approche pragmatiste*. Paris : Hermann.

- Bächtold, M. (2010). Saving Mach's view on atoms. *Journal for General Philosophy of Science*, 41(1), 1-19.
- Bächtold, M. (2011). L'espace dans ses dimensions transcendantale et pragmatiste. *Kant-Studien*, 102(2), 145-167.
- Bächtold, M. (2012a). Les fondements constructivistes de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation. *Tréma*, 38, 7-39.
- Bächtold, M. (ed.) (2012b). Epistémologie et didactique de la physique : le constructivisme en question. *Tréma*, 38.
- Bächtold, M. (2013a). Géométrie et espace chez Poincaré : aux sources du conventionnalisme. *Revue de l'enseignement philosophique*, 64(1), 10-23.
- Bächtold, M. (2013b). A pragmatic approach to the atomic model in chemistry. In J.-P. Llored (ed.), *The philosophy of chemistry: practices, methodologies, and concepts* (p. 426-451). Cambridge: Cambridge Scholars Publishing.
- Bächtold, M. (2013c). Accord intersubjectif et philosophie pragmatiste. *Klêsis, revue philosophique*, 26, 46-83.
- Bächtold, M. (2013d). Quelle épistémologie pour la didactique de la physique ? Éléments de réflexion sur la domination du constructivisme. In H. Galli *et al.* (eds.), *Les didactiques au prisme de l'épistémologie : une approche plurielle* (p. 55-68). Dijon : Éditions Universitaires de Dijon.
- Bächtold, M. (2013e). What do students "construct" according to constructivism in science education? *Research in Science Education*, 43(6), 2477-2496.
- Bächtold, M. (2014). L'équation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|c^2$ dans le programme et les manuels de Première S. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 10, 93-121.
- Bächtold, M. (2017a). On Bohr's epistemological contribution to the quantum-classical cut problems. In J. Faye and H. Folse (eds.), *Niels Bohr and the philosophy of physics: twenty-first century perspectives* (p. 235-252). London: Bloomsbury Academic.
- Bächtold, M. (2017b). Comment analyser et modéliser l'activité des enseignants en sciences ? Une tentative de synthèse comparative. In Bächtold, M., Boilevin, J.-M., Calmettes, B. (eds.). *La pratique de l'enseignant en sciences : comment l'analyser et la modéliser ?* (p. 159-178). Louvain : Presses Universitaires de Louvain.
- Bächtold, M. (2018). How should energy be defined throughout schooling? *Research in Science Education*, 48(2), 345-367.
- Bächtold, M., Boilevin, J.-M., Calmettes, B. (eds.) (2017). *La pratique de l'enseignant en sciences : comment l'analyser et la modéliser ?* Louvain : Presses Universitaires de Louvain.
- Bächtold, M., Durand-Guerrier & V., Munier, V. (eds.) (2017). *Epistémologie et didactique : synthèses et études de cas en mathématiques et en sciences expérimentales*. Presses Universitaires de Franche-Comté.
- Bächtold, M., François, T., Hausberger, T. & Marie-Jeanne, P. (2018). Géométries non-euclidiennes et interdisciplinarité mathématique-philosophie : un exemple d'activité pour la classe de terminale scientifique. *Repères IREM*, 111 (accepté, à paraître).
- Bächtold, M. & Guedj, M. (2014). Teaching energy informed by the history and epistemology of the concept with implications for teacher education. In M. Matthews (ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (p. 211-243). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bächtold, M. & Munier, V. (à paraître). Energy teaching at high school based on history and philosophy of science. *Selected papers from the 2017 ESERA conference*, « Science Education Research Series », Springer.
- Bächtold, M. & Munier, V. (accepté). Teaching energy at high school by making use of history and philosophy of science: a sequence based on Joule's experiment and Rankine's definition. *Journal of Research in Science Teaching*.
- Bächtold, M., Munier, V., Guedj, M., Lerouge, A., & Ranquet, A. (2014). Quelle progression dans l'enseignement de l'énergie de l'école au lycée ? Une analyse des programmes et des manuels. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 10, 63-92.

- Bächtold, M., Munier, V., Guedj, M., Lerouge, A. & Ranquet, A. (2016). Teaching energy in the light of the history and epistemology of the concept. *Proceedings of the GIREP-EPEC 2015 Conference*, Wrocław, Pologne, 6-10 juillet 2015.
- Balibar, F. (2010). Énergie. In D. Lecourt (ed.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (p. 403-408). Paris : Presses Universitaires de France.
- Ballentine, L. (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. Singapore: World Scientific.
- Barberousse, A., Kistler, M. & Ludwig, P. (2000). La philosophie des sciences au XXe siècle. Paris : Flammarion.
- Barrett, J. (1999). *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. Oxford: Oxford University Press.
- Barthes, A. & Jeziorski, A. (2012). What Kind of Critical University Education for Sustainable Development? A Comparative Study of European Students and Social Representations. *Journal of Social Science Education*, 11(4), 62-77.
- Barzilai, S. & Zohar, A. (2016). Epistemic (Meta)cognition: Ways of Thinking About Knowledge and Knowing. In J. Greene, W. Sandoval & I. Bråten (eds.), *Handbook of Epistemic Cognition* (p. 409-424), New York, NY: Routledge.
- Baviskar, S., Hartle, T. & Whitney, T. (2009). Essential criteria to characterize constructivist teaching: derived from a review of the literature and applied to five constructivist-teaching method articles. *International Journal of Science Education*, 31(4), 541-550.
- Bécu-Robinault, K. & Tiberghien, A. (1998). Integrating experiments into the teaching of energy. *International Journal of Science Education*. 20(1), 99-114.
- Bell, J. (1990). Against Measurement. *Physics World* 8 (1990), 33-40.
- Bell, R., Lederman, N. & Abd-El-Khalick, F. (2000). Developing and acting upon one's conception of the nature of science: a follow-up study. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), 563-581.
- Bensaude-Vincent, B. & Simon, J. (2008). *Chemistry: the impure science*. London: Imperial College Press.
- Bensaude-Vincent, B. (2003). Languages in chemistry. In M.J. Nye (ed.), *The Cambridge history of science, vol. 5: the modern physical and mathematical sciences* (p. 174-190). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bernal, A. & Dazal, E. (2010). On the epistemological and ontological status of chemical relations, *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 16, 80-103.
- Bitbol, M. (1996). *Mécanique quantique, une introduction philosophique*. Paris : Flammarion.
- Bitbol, M. (1998). Some Steps towards a Transcendental Deduction of Quantum Mechanics. *Philosophia Naturalis*, 35, 253-280.
- Blanchard, Ph., et al. (eds.) (2000). *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Blank, L. (2000). A metacognitive learning cycle: a better warranty for student understanding? *Science Education*, 84, 486-506.
- Blaye, A. & Lemaire, P. (2007). *Psychologie du développement cognitive de l'enfant*. Bruxelles : De Boeck.
- Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. Part I and Part II. *Physical Review*, 85, Part I: 166-179; Part II: 180-193.
- Bohr, N. (1934). *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bohr, N. (1958). *Atomic Physics and Human Knowledge*. New York: J. Wiley & Sons.
- Bohr, N. (1963). *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New-York: Interscience.
- Boilevin, J.-M. (2013). *Rénovation de l'enseignement des sciences physiques et formation des enseignants : regards didactiques*. Bruxelles : De Boeck.
- Boilevin, J.-M. (2017). La démarche d'investigation : simple effet de mode ou bien nouveau mode d'enseignement des sciences ? In M. Bächtold, V. Durand-Guerrier & V. Munier (eds.) (2017). *Epistémologie et didactique : synthèses et études de cas en mathématiques et en sciences expérimentales* (p. 195-220), Presses Universitaires de Franche-Comté.

- Boilevin, J.-M., Delserieys, A., Brandt-Pomares, P., & Coupaud, M. (2016). *Démarches d'investigation : histoire et enjeux*. In C. Marlot & L. Morge (dir.), *L'investigation scientifique et technologique : comprendre les difficultés de mise en œuvre pour mieux les réduire* (p. 23-44), Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Bondi, H. & Spurgin, C. (1987). Energy has mass. *Physics Bulletin*, n° 38, p. 62-63.
- Brewe, E. (2011). Energy as a substance like quantity that flows: theoretical considerations and pedagogical consequences. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 7, 1-14.
- Brousseau, G. (1998 [1970-1990]). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble: La pensée sauvage.
- Brush, S. (1976). *The kind of motion we call heat: a history of the kinetic theories of gases in the 19th century, Volumes I and II*. Oxford: North-Holland Publishing Company.
- Bryce, T. & Day, B. (2014). Scepticism and doubt in science and science education: the complexity of global warming as a socio-scientific issue. *Cultural Studies of Science Education*, 9(3), 599-632.
- Bunge, M. (2000). Energy: between physics and metaphysics. *Science & Education*, 9, 457-461.
- Buty, C. & Plantin, C. (2008). Variété des modes de validation des arguments en classe de science. In C. Buty & C. Plantin (eds.). *Argumenter en classe de sciences: du débat à l'apprentissage* (p. 235-280), Lyon: INRP.
- Calmettes, B. & Boilevin, J.-M. (2014). Le modèle « investigation-structuration » et l'actualité des tensions autour des constructivismes. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 9, 103-128.
- Calmettes, B. (2000). Les dessins d'observation dans les premières phases d'étude d'objets et de phénomènes. *Aster*, 31, 217-244.
- Camilleri, K. & Schlosshauer, M. (2015). Niels Bohr as philosopher of experiment: does decoherence theory challenge Bohr's doctrine of classical concepts? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 49, 73-83.
- Carey, S. (2009). *The origin of concepts*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Cariou, J.-Y. (2011). Histoire des démarches en sciences et épistémologie scolaire, *Revue de Didactique des Sciences et des Techniques*, 3, 83-106.
- Carnap, R. (1931). Überwindung der Metaphysik durch logische Analyse der Sprache. *Erkenntnis*, 2, 219-241
- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford: Oxford University Press.
- Cassirer, E. (1977 [1910]). *Substance et fonction, éléments pour une théorie du concept* (tr. fr.). Paris : Les éditions de Minuit.
- Cassirer, E. (2000 [1920]). *La théorie de la relativité d'Einstein* (tr. fr.). Paris : Les Éd. du Cerf.
- CE (Commission Européenne) (2012). *Responsible Research and Innovation: Europe's ability to respond to societal challenges*. European Union.
- Chalmers, A. (1987 [1976]). *Qu'est-ce que la science? Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend*. Paris : La Découverte.
- Chang, H. (2011). How Historical Experiments Can Improve Scientific Knowledge and Science Education: The Cases of Boiling Water and Electrochemistry. *Science & Education*, 20, 317-341.
- Charpak, G. (dir.) (1996). *La Main à la pâte : les sciences à l'école primaire*. Paris : Flammarion.
- Chateauraynaud, F., Debaz & J. Fintz, M. (2013). Aux frontières de la sécurité sanitaire. Les controverses métrologiques sur les faibles doses et les perturbateurs endocriniens. *Natures Sciences Sociétés*, 21, 271-281.
- Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble : La pensée sauvage.
- Chin, C. & Chia, L.-G. (2004). Problem-based learning: using students' questions to drive knowledge construction. *Science Education*, 88, 707-727.
- Churchland, P. (1988). Perceptual plasticity and theoretical neutrality: a reply to Jerry Fodor. *Philosophy of Science*, 55, 167-87.
- Clark, D., Stegmann, K., Weinberger, A., Menekse, M., & Erkens, G. (2007). Technology-Enhanced Learning Environments to Support Students' Argumentation. In S. Erduran & M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education* (p. 217-243). Springer.

- Clément, E., Demonque, C., Hansen-Løve, L. & Kahn, P. (1994). *Pratique de la philosophie de a à z*. Paris : Hatier.
- Clough, M. (2011). Teaching and assessing the nature of science: How to effectively incorporate the nature of science in your classroom. *The Science Teacher*, 78(6), 56-60.
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L. (2003). Design experiments in educational research. *Educational Researcher*, 32(1), 9-13.
- Coelho, R. (2009). On the concept of energy: how understanding its history can improve physics teaching. *Science & Education*, 18, 961-983.
- Coelho, R. (2014). On the concept of energy: eclecticism and rationality. *Science & Education*, 23, 1361-1380.
- Colonnese, D., Heron, P., Michelini, M., Santi, L. & Stefanel, A. (2012). A vertical pathway for teaching and learning the concept of energy. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6(1), 21-50.
- Coquidé, M., Fortin, C. & Rumelhard, G. (2009). L'investigation : fondements et démarches, intérêts et limites, *Aster*, 49, 49-76.
- Cotignola, M., Bordogna, C., Punte, G., & Cappannini, O. (2002). Difficulties in learning thermodynamic concepts: are they linked to the historical development of this field? *Science & Education*, 11, 279-291.
- Crahay, M., Wanlin, P., Laduron, I. & Issaieva, E. (2010). Fonctions, structuration et évolution des croyances (et connaissances) des enseignants. *Revue Française de Pédagogie*, 172, 85-129.
- D'Espagnat, B. (1990). Towards a Separable 'Empirical Reality'? *Foundations of Physics*, 20, 1147-1172.
- D'Espagnat, B. (1994). *Le réel voilé, analyse des concepts quantiques*. Paris : Fayard.
- De Berg, K. (1997). The development of the concept of work: a case study where history can inform pedagogy. *Science & Education*, 6, 511-527.
- De Hosson, C., (2011). *L'histoire des sciences: un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique* (note de synthèse pour une HDR). University Paris-Diderot. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655594/>.
- De Muynck, W. (1986). On the Relation between the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox and the Problem of Nonlocality in Quantum Mechanics. *Foundations of Physics*, 16, 973-1002.
- De Muynck, W. (2002). *Foundations of Quantum Mechanics, an Empiricist Approach*. Dordrecht: Kluwer.
- Delfour, J.-J. (2003). L'espace et la spatialité chez Kant (esthétique transcendantale, §2 et 3). *Kairos* 22, 9-59.
- Dell'Angelo, M., Coquidé, M. & Magneron, N. (2012). Statut de l'investigation dans les standards de l'enseignement scientifique : cas des USA, de la Suisse et de la France. Dans B. Calmettes (ed.), *Didactique des sciences et démarches d'investigation : références, représentations, pratiques et formation* (pp. 27-57). Paris : L'Harmattan.
- DiSessa, A., & Cobb, P. (2004). Ontological innovation and the role of theory in design experiments. *The Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 77-103.
- Doise, W. & Mugny, G. (1981). *Le développement social de l'intelligence*. Paris: Interéditions.
- Doise, W., Mugny, G. & Perret-Clermont, A. (1975). Social interaction and the development of cognitive operation. *European Journal of Social Psychology*, 5, 367-383.
- Driver, R. & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Driver, R. & Oldham, V. (1986). A constructivist approach to curriculum development in Science. *Studies in Science Education*, 13, 105-122.
- Driver, R. & Warrington, L. (1985). Student's use of the principle of energy conservation in problem situation. *Physics Education*, 5, 171-175.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Mortimer, E. & Scott, P. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.

- Driver, R., Guesne, E. & Tiberghien, A. (eds.) (1985). *Children's ideas in science*. Buckingham, Bristol: Open University Press.
- Driver, R., Newton, P. & Osborne, J. (2000). Establishing the Norms of Scientific Argumentation in Classrooms. *Science Education*, 84(3), 287-312.
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. & Wood-Robinson, V. (1994). *Making sense of secondary science: research into children's ideas*. Londres et New York: Routledge.
- Dufour, E. et Servois, J. (2005). Le statut de l'espace esthétique dans la philosophie kantienne. *Kant-Studien*, 96, 161-181.
- Duhem, P. (1981 [1906]). *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris : Vrin.
- Duit, R. (1981). Understanding energy as a conserved quantity. *European Journal of Science Education*, 3(3), 291-301.
- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school: empirical results from the Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19, 59-66.
- Duit, R. (1987). Should energy be introduced as something quasi-material? *International Journal of Science Education*, 9, 139-145.
- Duit, R. (1995). The constructivist view: a fashionable and fruitful paradigm for science education. In L. Steffe & J. Gale (eds.), *Constructivism in education* (pp. 271-285), Hillsdale (NJ): Erlbaum.
- Duit, R. (2009). Bibliography: students' and teachers' conceptions and science education. <<http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>> (consulté le 9 février 2012).
- Duit, R. (2014). Teaching and learning the physics energy concept. In R. Chen et al. (eds.) (2014). *Teaching and learning of energy in K-12 education* (p. 67-85). Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Dumas-Carré, A. & Goffard, M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique : concepts et démarches*. Paris: Armand Colin.
- Duschl, R. & Osborne, J. (2002). Supporting and promoting argumentation discourse in science education. *Studies in Science Education*, 38, 39-72.
- Eddington, A. (1920). *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Einstein, A. (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 17, 639-641.
- Elkana, Y. (1974). *The discovery of the conservation of energy*. London: Hutchinson Educational LTD.
- Ellse, M. (1988). Transferring not transforming energy. *School Science Review*, 69(248), 427-437.
- Erduran, S., Ozdem, Y., & Park, J.-Y. (2015). Research trends on argumentation in science education: a journal content analysis from 1998-2004. *International Journal of STEM Education*, 2, Article 5.
- Erduran, S., Simon, S., & Osborne, J. (2004). TAPing into argumentation: developments in the application of Toulmin's argument pattern for studying science discourse. *Science Education*, 88(6), 915-933.
- Fabre, M. & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, 24, 37-57.
- Fabre, M. (2009). *Philosophie et pédagogie du problème*. Paris : Vrin.
- Falk, G., Hermann, F. & Schmid, G. (1983). Energy forms or energy carriers? *American Journal of Physics*, 51(12), 1074-1077.
- Faye, J., Folse, H. (eds.) (2017). *Niels Bohr and the philosophy of physics: twenty-first century perspectives*. London: Bloomsbury Academic.
- Felton, M. (2004). The development of discourse strategies in adolescent argumentation. *Cognitive Development*, 19, 35-52.
- Feynman, R. (1963). *The Feynman lectures on physics, vol. I: mainly mechanics, radiation, and heat*. California Institute of Technology.
- Finkelstein, J. (1998). Yet Another Comment on 'Nonlocal Character of Quantum Theory' (arXiv eprint: quant-ph/9801011).
- Fodor, J. (1984). Observation reconsidered. *Philosophy of Science*, 51(1), 23-43.

- Forman, P. (1971). Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment. *Historical Studies Physical Sciences*, 3, 1-115.
- Fortus, D., Kubsch, M., Lehavi, Y., Opitz, S. & Nordine, J. (2017). Assessing the preparation for future learning of energy. *ESERA 2017 Conference*, Dublin, Irlande.
- Fortus, D., Sutherland, L., Reiser, B. & Krajcik, J. (2015). Assessing the role of curriculum coherence in student learning about energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(10), 1408-1425.
- Fosnot, C. & Perry, R. (2005). Constructivism: a psychological theory of learning. In C. Fosnot (ed.), *Constructivism: theory, perspectives, and practice* (pp. 8-38), New York and London: Teachers College Press.
- Frauchiger, D. & Renner, R. (2016). Single-world interpretations of quantum theory cannot be self-consistent. (arXiv eprint: quant-ph/1604.07422).
- Fuchs, C. & Schack, R. (2015). QBism and the Greeks: Why a Quantum State Does Not Represent An Element of Physical Reality. *Physica Scripta*, 90(1), 015104.
- Fuchs, C. (2016). On participatory realism. In I. Durham and D. Rickles (eds.), *Information and Interaction: Eddington, Wheeler and the Limits of Knowledge* (p. 113-134). Berlin: Springer.
- Fuchs, C. (2017). Notwithstanding Bohr, the reasons for QBism (arXiv eprint: quant-ph/1705.03483).
- Gale, G. (1995). Preface. Dans L. Steffe & J. Gale (eds.), *Constructivism in education* (pp. ix-xvii). Hillsday (New Jersey): Erlbaum.
- Galili, I. & Lehavi, Y. (2006). Definitions of physical concepts: a study of physics teachers' knowledge and views. *International Journal of Science Education*, 28(5), 521-541.
- Galison, P. (2002 [1987]). *Ainsi s'achèvent les expériences, la place des expériences dans la physique du XX^e siècle* (tr. fr.). Paris : La Découverte.
- Gallagher, S., Stepien, W., Sher, B. & Workman, D. (1995). Implementing problem-based learning in science classroom. *School Science and Mathematics*, 95(3), 136-146.
- Garcia-Mila, M. & Andersen, C. (2007). Cognitive foundations of learning argumentation. In S. Erduran & M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education* (p. 29-45). Springer.
- Gauld, C. (1991). History of science, individual development and science teaching, *Research in Science Education*, 21, 133-140.
- Gaussel, M. (2016). Développer l'esprit critique par l'argumentation : de l'élève au citoyen. *Dossiers de veille de l'IFÉ*, 108.
- Ghirardi, G., Rimini, A. & Weber, T. (1986). Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*, 34, 470-491.
- Giannetto, E. (1993). The impetus theory : between history of physics and science education, *Science & Education*, 2, 227-238.
- Gilbert, J. (2004). Models and modelling: routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2, 115-130.
- Gil-Perez, D. (1993). Apprendre les sciences par une recherche de démarche scientifique. *Aster*, 17, 41-64.
- Gil-Perez, D., Martinez-Torregrosa, J. & Senent-Pérez, F. (1987). La résolution de problèmes comme activité de recherché: un instrument de changement conceptuel et méthodologique. *Petit x*, 14-15, 25-38.
- Giulini, D. et al. (eds.) (1996). *Decoherence and the Appearance of the Classical World in Quantum Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gobert, J. & Buckley, B. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 891-894.
- Golder, C., & Favart, M. (2003). Argumenter c'est difficile... oui, mais pourquoi ? approche psycholinguistique de la production argumentative en situation écrite. *Etudes de linguistique appliquée*, 130(2), 187-209.
- Goldring, H. & Osborne, J. (1994). Students' difficulties with energy and related concepts. *Physics Education*, 29(1), 26-32.

- Good, R. (1993). The many forms of constructivism. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(9), 1015.
- Guerra, F. Leone, M. & Robotti, N. (2014). When Energy Conservation Seems to Fail: The Prediction of the Neutrino. *Science & Education*, 23, 1339-1359.
- Guerra, M. (2012). Teachers' Ideas About the Nature of Science: A Critical Analysis of Research Approaches and Their Contribution to Pedagogical Practice. *Science & Education*, 21, 631-655.
- Guerra, M., Ryder, J. & Leach, J. (2010). Ideas about the nature of science in pedagogically relevant contexts: insights from a situated perspective of primary teachers' knowledge. *Science Education*, 94(2), 282-307.
- Gurgand, M., Munier, V., Bächtold, M., Bellue, S., Bouguen, A., Cross, D., Djerioua, H. (2017). Les formations des Maisons pour la Science : démarche et résultats préliminaires. *Colloque « Evaluation de l'enseignement fondé sur investigation du raisonnement scientifique et de l'esprit critique : état des lieux et perspectives pour l'avenir »*, Paris.
- Guzzardi, L. (2014). Energy, Metaphysics, and Space: Ernst Mach's Interpretation of Energy Conservation as the Principle of Causality. *Science & Education*, 23, 1269-1291.
- Habermas, J. (2001). *Vérité et justification* (tr. fr.). Paris : Gallimard.
- Hacking, I. (1989 [1983]). *Concevoir et expérimenter : thèmes introductifs à la philosophie des sciences expérimentales* (tr. fr.). Paris : Christian Bourgeois.
- Hanson (2001 [1958]). *Modèles de la découverte : une enquête sur les fondements conceptuels de la science*. Chennevières-sur-Marne : Dianoïa.
- Hanuscin, D., Lee, M. & Akerson, V. (2011). Elementary teachers' pedagogical content knowledge for teaching the nature of science. *Science Education*, 95(1), 145-167.
- Harman, P. (1982). *Energy, force and matter: the conceptual development of nineteenth-century physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harré, R. & Llored, J.-P. (2011). Mereologies as the grammars of chemical discourses, *Foundations of Chemistry*, 13, 63-76.
- Harrison, A. & Treagust, D. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026.
- Harrison, A., Grayson, D. & Treagust, D. (1999). Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 55-87.
- Healey, R. (1989). *The Philosophy of Quantum Mechanics: An Interactive Interpretation*. Cambridge University Press.
- Healey, R. (2012). Quantum Theory: A Pragmatist Approach. *British Journal for the Philosophy of Science*, 63(4), 729-771.
- Healey, R. (2017). Quantum-Bayesian and Pragmatist Views of Quantum Theory. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/quantum-bayesian/>
- Heisenberg, W. (1972 [1969]). *Le tout et la partie: le monde de la physique atomique* (tr. fr.). Paris: Flammarion.
- Hertz, H. (1894). *Die Prinzipien der Mechanik: in neuen zusammenhänge dargestellt*. Leipzig: Barth.
- Hiebert, E. (1981). *Historical roots of the principle of conservation of energy*. New York: Arno Press.
- Hobson, A. (2004). Energy and work: the meaning of energy. *The Physics Teacher*, 42(5), 260.
- Hodson, D. (2014). Nature of science in the science curriculum: origin, development, implications and shifting emphases. In M. Matthews (ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (p. 911-970). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hofer, B. (2004). Epistemological understanding as a metacognitive process: thinking aloud during online searching. *Educational Psychologist*, 39(1), 43-55.
- Hoffmann, R. & Laszlo, P. (1991). Representation in chemistry, *Angewandte Chemie*, 30, 1-16.
- Hofstadter, D. & Sander, E. (2013). *L'analogie : coeur de la pensée*. Paris : Odile Jacob.
- Host, V. & Martinand, J.-L. (eds.) (1975). *Activités d'éveil à l'école élémentaire : initiation physique et technologique*. Paris : INRDP.

- Höttecke, D. & Silva, C. (2011). Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge: An Analysis of Obstacles. *Science & Education*, 20, 293-316.
- Houdé, O. & Winnykammen, F. (1992). Les apprentissages cognitifs individuels et interindividuels. *Revue Française de Pédagogie*, 98,83-103.
- Hughes, R. (1989). *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge (Mass.): Harvard University Press.
- Hume, D. (1983 [1748]). *Enquête sur l'entendement humain* (tr. fr.). Paris : Flammarion.
- Iordanou, K. (2010). Developing argument skills across scientific and social domains. *Journal of Cognition and Development*, 11(3), 293-327.
- Jacob, P. (1980). *L'empirisme logique, ses antécédents, ses critiques*. Paris : Les éditions de Minuit.
- James, W. (2003 [1892]). *Précis de psychologie* (tr. fr.). Paris : Les Empêcheurs de Penser en Rond.
- James, W. (2007 [1907]). James, W., *Le pragmatisme* (tr. fr.). Paris : Flammarion.
- Jammer, M. (1993). *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*. New York: Dover Publications.
- Jenkins, E. (2000). Constructivism in school science education: powerful model or the most dangerous intellectual tendency? *Science & Education*, 9, 599-610.
- Jewett, J. (2008). Energy and the confused student III: language. *The Physics Teacher*, 46(3), 149-153.
- Jiménez-Aleixandre, M. & Erduran, S. (2007). Argumentation in Science Education: An Overview. In S. Erduran & M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education* (p. 3-28). Springer.
- Jiménez-Aleixandre, M., Eirexas, F. & Agraso, M. (2006). Use of evidence in arguments about a socio-scientific issue by 12th grade students : choices about heating system and energy sources. (Actes de la réunion de la National Association for Research in Science Teaching)
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Joos, E. et al. (eds). 2003. *Decoherence and the Appearance of the Classical World in Quantum Theory, second edition*. Berlin: Springer.
- Jordan, T. (1969). *Linear Operators for Quantum Mechanics*. New-York: Wiley.
- Jordan, T. (1975). Why – $i\vec{\nabla}$ Is the Momentum”, *American Journal of Physics*. 43, 1089-1093.
- Joule, J. (1847a). On matter, living force, and heat. Published in the Manchester Courier newspaper, May 5 and 12. Reprinted in *The Scientific Papers of James Prescott Joule, Vol. 1, 1884* (p. 265-276). Taylor & Francis.
- Joule, J. (1847b). On the mechanical equivalent of heat, as determined by the heat evolved by the friction of fluids. *Philosophical Magazine, series 3*, 31, 173-176.
- Kahn, P. (2000). L'enseignement des sciences : de Ferry à l'éveil, *Aster*, 31, 9-35.
- Kanderakis, N. (2014). What is the Meaning of the Physical Magnitude 'Work'? *Science & Education*, 23, 1293-1308.
- Kang, S., Scharmann, L. & Noh, T. (2005). Examining students' views on the nature of science: results from Korean 6th, 8th, and 10th graders. *Science Education*, 89(2), 314-334.
- Kant (1967 [1781, 1787]). *Critique de la raison pure* (tr. fr.), Paris : Presses Universitaires de France.
- Kaper, W. & Goedhart, M. (2002). 'Forms of energy': an intermediary language on the road to thermodynamics? Part I & II. *International Journal of Science Education*, 24(1), 81-96, 24(2), 119-138.
- Karisan, D. & Zeidler, D. (2017). Contextualization of nature of science within the socioscientific issues framework: a review of research. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 5(2), 139-152.
- Kauark-Leite, P. (2012). *Théorie quantique et philosophie transcendantale: dialogues possibles*. Paris : Hermann.
- Kauertz, A. & Fischer, H. E. (2006). Assessing students' level of knowledge and analysing the reasons for learning difficulties in physics by Rasch analysis. In X. Liu & W. J. Boone (Eds.), *Applications of Rasch measurement in science education* (p. 212–246). Maple Grove, USA: JAM Press.

- Khishfe, R. & Abd-El-Khalick, F. (2002). Influence of explicit and reflective versus implicit inquiry-oriented instruction on sixth graders' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(7), 551-578.
- Kotzee, B. (2010). Seven posers in the constructivist classroom. *London Review of Education*, 8(2), 177-187.
- Kuhn, D. & Udell, W. (2003). The development of argument skills. *Child Development*, 74(5), 1245-60.
- Kuhn, D. (2000). Metacognitive Development. *Current Directions in Psychological Science*, 9(5), 178-181
- Kuhn, D. , Hemberger, L. & Khait, V. (2016). *Argue with me: developing thinking and writing through dialog*. Bronxville, NY: Wessex Press.
- Kuhn, T. (1959). Energy conservation as an example of simultaneous discovery. In M. Clagett (ed.), *Critical Problems in the History of Science* (p. 321-56). Madison (Wis.): The University of Wisconsin Press.
- Kuhn, T. (1983 [1962]). *La structure des révolutions scientifiques* (tr. fr.). Paris : Flammarion.
- La main à la pâte et le Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école (2002). *Guide de découverte*. Paris : INRP.
<http://www.lamap.fr/bdd_image/51_brochure_lamap.pdf> (consulté le 9 février 2012).
- Lacy, S., Tobin, R.G., Wiser, M. & Crissman, S. (2014). Looking through the energy lens: a proposed teaching progression for energy in grades 3-5. In R. Chen et al. (eds.) (2014). *Teaching and learning of energy in K-12 education* (p. 241-265). Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Ladyman, J. (1998). What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, 29, 409-424.
- Lalande, A. (1997). *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Lange, J.-M. & Victor, P. 2006). Didactique curriculaire et « éducation à... la santé, l'environnement et au développement durable » : quelles questions, quels repères ? *Didaskalia*, 28, 85-100.
- Latour, B. et Woolgar, S., (1996 [1979]). *La vie de laboratoire, la production des faits scientifiques* (tr. fr.). Paris : La Découverte, 1988.
- Laudan, L. (1981). A Confutation of Convergent Realism. *Philosophy of Science*, 48, 19-48.
- Laurence, S. & Margolis, E. (1999). Concepts and cognitive science. In S. Laurence & E. Margolis (eds.), *Concepts: core reading* (pp. 3-81), Cambridge (Mas.): MIT Press.
- Lawrence, C. Rodger, A. & Compton, R. (1996). *Foundations of physical chemistry*. Oxford: Oxford University Press.
- Lederman, J., Lederman, N., Bartos, S., Bartels, S., Meyer, A. & Schwartz, R. (2014). Meaningful assessment of learners' understandings about scientific inquiry – The views about scientific inquiry (VASI) questionnaire. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(1), 65-83.
- Lederman, N. (1999). Teachers' understanding of the nature of science and classroom practice: factors that facilitate or impede the relationship. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(8), 916–929.
- Lederman, N. (2007). Nature of science: past, present, and future. In S. Abell & N. Lederman (eds.), *Handbook of research on science education* (p. 831-879). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lederman, N., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. & Schwartz, R. (2002). Views of nature of science questionnaire: toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 497–521.
- Lee H.-S. & Liu O. (2010). Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades: the knowledge integration perspective. *Science Education*, 94(4), 665-688.
- Lee, Y. C. & Grace, M. (2012). Students' reasoning and decision making about a socioscientific issue: A cross-context comparison. *Science Education*, 96, 787–807.
- Legardez, A., Simonneaux, L. (2006). *L'école à l'épreuve de l'actualité : enseigner les questions vives*. ESF éditions.

- Lemeignan, G. & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris : Hachette.
- Lemieux, C. (2007). À quoi sert l'analyse des controverses ? *Mil neuf cent*, 25, 191-212.
- Lepareur, C., Cross, D. & Munier V. (2017). Characterizing PCK in a Teachers Training Program. *ESERA 2017 Conference*, Dublin, Irlande.
- Levinson, R. et al. (2017). *Science and society in education: socio-scientific inquiry-based learning, connecting formal and informal science education with society*. PARRISE.
- Lewis, E. & Linn, M. (1994). Heat energy and temperature concepts of adolescents, adults, and experts: implications for curricular improvements. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(6), 657-677.
- Lewis, J. & Leach, J. (2006). Discussion of socio-scientific issues: The role of science knowledge.
- Lijnse, P. (1990). Energy between the life-world of pupils and the world of physics. *Science Education*, 74(5), 571-583.
- Liu, X. & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy: analysis of selected items from the TIMSS database. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), 493-517.
- Llored, J.-P. (2010). Mereology and quantum chemistry: the approximation of molecular orbital, *Foundations of Chemistry*, 12, 203-221.
- Loyens, S. & Gijbels, D. (2008). Understanding the effects of constructivist learning environments: introducing a multi-directional approach. *Instructional Science*, 36, 351-357.
- Lyre, H. (2000). Kann moderne Physik *a priori* begründbar sein? *Philosophia Naturalis*, 37, 439-454.
- Macagno, F. (2016). Argument relevance and structure: assessing and developing students' uses of evidence. *International Journal of Educational Research*, 79, 180–194.
- Mach, E. (1986 [1896]). *Principles of the theory of heat: Historically and critically elucidated* (tr. angl.). Dordrecht: Reidel.
- Mach, E. (1987 [1883]). *La mécanique : exposé historique et critique de son développement* (tr. fr.). Paris: Gabay, 1987.
- Maisons pour la science (2018). *Le développement professionnel*. <http://www.maisons-pour-la-science.org/node/4398>.
- Malrieu, J.-P. (2008). Entre physique et chimie, une discipline métisse : la chimie quantique. In P. Hilbert & N. Trong Anh, *Introduction à la chimie quantique* (p. 5-19). Palaiseau : Les Editions de l'Ecole Polytechnique.
- Margenau, H. (1950). *The nature of physical reality*. New York: McGraw-Hill.
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière : des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Berne : Peter Lang.
- Martinand, J.-L. et al. (coord.) (1980). *Activités d'éveil scientifiques à l'école élémentaire, V : démarches pédagogiques en initiation physique et technologique*. INRP.
- Mason, L. & Santi, M. (1994). Argumentation structure and metacognition in constructing shared knowledge at school. Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association New Orleans, LA.
- Mason, L. & Scirica, F. (2006). Prediction of students' argumentation skills about controversial topics by epistemological understanding. *Learning and Instruction*, 16(5), 492-509.
- Matthews, M. (1994). *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York, London: Routledge.
- Matthews, M. (1997). Introductory comments on philosophy and constructivism in science education. *Science & Education*, 6(1-2), 5-14.
- Matthews, M. (2000). Constructivism in science and mathematics education. In D. Phillips (ed.), *National Society for the Study of Education, 99th Yearbook* (pp. 161-192), Chicago: University of Chicago Press.
- Matthews, M. (2012). Changing the focus: from nature of science (NOS) to features of science (FOS). In M. Khine (ed.), *Advances in nature of science research: concepts and methodologies* (p. 3-26). Dordrecht: Springer.

- Mayer, R. (2009). Constructivism as a theory of learning versus constructivism as a prescription for instruction. In S. Tobias & T. Duffy (eds.), *Constructivist instruction: success or failure?* (pp. 184-200), New York: Routledge.
- McComas, W. (1998). The principal elements of the nature of science: dispelling the myths. In W. McComas (ed.), *The nature of science in science education: rationales and strategies* (p. 41-52). Dordrecht: Kluwer.
- McIldowie, E. (2004). A trial of two energies. *Physics Education*, 39(2), 212-214.
- McQuarrie, C., Rock, P. & Gallogly, E. (2011). *General chemistry*. Mill Valley (Ca): University Science Books.
- Melo, E. & Bächtold, M. (accepté). A theater-based device for training teachers on the nature of science. *Science & Education*.
- Melo, E. (2016). *La nature de la science dans la formation initiale des enseignants de physique : contributions du théâtre Kellyien*. Thèse de l'Université Fédérale Rurale de Pernambuco, Brésil.
- MEN (Ministère de l'Éducation nationale, France) (2000). Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, n°23 du 15 juin 2000.
- MEN (2001). Programme de l'enseignement de physique-chimie en classe terminale de la série scientifique. *Bulletin officiel de l'Éducation nationale*, hors-série, n°4, 30 août 2001.
- MEN (2005). Programmes des collèges : introduction commune à l'ensemble des disciplines scientifiques. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, n°5 du 25 août 2005.
- MEN (2006). Socle commun de connaissances et de compétences. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, n° 29 du 20 juillet 2006.
- MEN. (2008a). Programmes d'enseignement de l'école primaire. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, hors série n°3 du 19 juin 2008.
- MEN (2008b). Programmes du collège : programmes de l'enseignement de physique-chimie. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n° 6 du 28 août 2008.
- MEN (2010a). Programmes de physique-chimie en classe de seconde générale et technologie. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n°4 du 29 avril 2010.
- MEN (2010b). Programme d'enseignement spécifique de physique-chimie en classe de première de la série scientifique. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n°4 des 9 et 30 septembre 2010.
- MEN (2011). Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie, classe terminale de la série scientifique. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n°8 du 13 octobre 2011.
- MEN (2012). Progressions pour le cours élémentaire deuxième année et le cours moyen, sciences expérimentales et technologie. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, 5 janvier 2012.
- MEN (2015). Programme d'enseignement du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle 2), du cycle de consolidation (cycle 3) et du cycle des approfondissements (cycle 4). *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n°11 du 26 novembre 2015.
- Mermin, D. (2017). Why QBism is Not the Copenhagen Interpretation and What John Bell Might Have Thought of It. In R. Bertlmann & A. Zeilinger (eds.), *Quantum [Un]Speakables II: 50 Years of Bell's Theorem* (p. 83–93), Berlin: Springer.
- Mermin, D., (2014). QBism Puts the Scientist Back into Science. *Nature*, 507(7493), 421–3.
- Meyerson, E. (1908). *Identité et réalité*. Paris: Alcan.
- Millar, D. (2005). Teaching about energy. Department of Educational Studies: research paper 2005/11. <http://www.york.ac.uk/media/educationalstudies/documents/research/Paper11Teachingaboutenergy.pdf>.
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11(5), 587-596.
- Mittelstaedt, P., *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*, Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- Moreau, J. (1984). *La problématique kantienne*. Paris : Vrin.

- Morin, O., Simonneaux, L., Simonneaux, J., Tytler, R. & Barraza, L. (2014). Developing and using an S³R model to analyze reasoning in web-based cross-national exchanges on sustainability. *Science Education*, 98(3), 517–542.
- Muis, K. (2007). The Role of Epistemic Beliefs in Self-Regulated Learning. *Educational Psychologist*, 42(3), 173–190.
- Muller Mirza N. (2009). Préface. In C. Buty & C. Plantin (eds.), *Argumenter en classe de sciences : du débat à l'apprentissage* (p. 7-16), INRP.
- Muller Mirza, N., Perret-Clermont, A.-N. & Iannaccone A., (2009). Psychosocial processes in argumentation. In N. Muller-Mirza & A.-N. Perret-Clermont (eds.), *Argumentation and education: theoretical foundations and practices* (p. 67-90), Berlin : Springer.
- Muller-Mirza, N. & Perret-Clermont, A.-N. (eds.) (2009). *Argumentation and education: theoretical foundations and practices*. Berlin : Springer.
- Neumann K., Viering T., Boone W. & Fischer H. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(2), 162-188.
- Nola, R. (1997). Constructivism in science and in science education: a philosophical critique. *Science & Education*, 6(1-2), 55-83.
- Nordine J, Krajcik J. & Fortus D. (2011). Transforming energy instruction in middle school to support integrated understanding and future learning. *Science Education*, 95(4), 670-699.
- Nott, M. & Wellington, J. (1996). Probing teachers' views of the nature of science: how should we do it and where should we be looking? In G. Welford, J. Osborne, & P. Scott (eds.), *Research in science education in Europe: current issues and themes* (p. 283-293). London: Falmer Press.
- NRC (National Research Council) (1996). *National science education standards*. Washington: National Academy Press.
- NRC (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. Washington: National Academy Press.
- Nussbaum, E., Sinatra, G. & Poliquin, A. (2008). Role of epistemic beliefs and scientific argumentation in science learning. *International Journal of Science Education*, 30(15), 1977-1999.
- Nye, M. (1993). *From chemical philosophy to theoretical chemistry: dynamics of matter and dynamics of disciplines, 1800-1950*. Berkeley, Los Angeles, London: University of California Press.
- OCDE (2011). *Résultats du PISA 2009 : savoirs et savoir-faire des élèves – Performance des élèves en compréhension de l'écrit, en mathématiques et en sciences (Volume I)*. Disponible sur Internet : <<http://dx.doi.org/10.1787/9789264097643-fr>> (consulté le 9 février 2012).
- Orange, C. (2005). Problème et problématisation dans l'enseignement scientifique, *Aster*, 40, pp. 3-11.
- Osborne, J. (1996). Beyond constructivism. *Science Education*, 80(1), 53-82.
- Osborne, J., Erduran, S., & Simon, S. (2004). Enhancing the Quality of Argument in School Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(10), 994-1020.
- Ostwald, W. (1910). *L'énergie* (trad. fr.). Paris : Alcan.
- Papadouris, N. & Constantinou, C. (2011). A philosophically informed teaching proposal on the topic of energy for students aged 11-14. *Science & Education*, 20, 961-979.
- Papadouris, N. & Constantinou, C. (2016). Investigating middle school students' ability to develop energy as a framework for analyzing simple physical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(1), 119-145.
- Park, D. & Lee, Y. (2009). Different conceptions of the nature of science among preservice elementary teachers of two countries. *Journal of Elementary Science Education*, 21(2), 1-14.
- Perrenoud, P. (1993). Curriculum : le formel, le réel, le caché. In J. Houssaye (dir.), *La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui* (p. 61-76). Paris : ESF éditeur.
- Perrin-Glorian, M.-J. (2011). L'ingénierie didactique à l'interface de la recherche avec l'enseignement. Vers une ingénierie didactique de deuxième génération? In C. Margolinas, M. Abboud-Blanchard, L. Bueno-Ravel, N. Douek, A. Fluckiger, P. Gibel, et al. (eds.), *En amont et en aval des ingénieries didactiques* (p. 57-77). Grenoble: La pensée sauvage.
- Pestre, D. (2006). Introduction aux Science Studies. Paris : La découverte.

- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1972). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (1969). *Psychologie et pédagogie*. Paris: Denoël.
- Piaget, J. (1970). *Psychologie et épistémologie*, Paris : Denoël.
- Piaget, J. (1973 [1949]). *Introduction à l'épistémologie génétique, Tome 2 : la pensée physique*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (1977 [1936]). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel, Paris : Delachaux & Niestlé.
- Piaget, J. (1977a [1936]). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel, Paris: Delachaux & Niestlé.
- Piaget, J. (1977b [1937]). *La construction du réel chez l'enfant*. Lausanne: Delachaux & Niestlé.
- Piaget, J. et Garcia, R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris : Flammarion.
- Piaget, J., Inhelder, B. et Szeminska, A. (1973). *La géométrie spontanée de l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Pickering, A. (1995). *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Pizzini, E., Shepardson, D. & Abell, S. (1989). A rationale for the development of a problem solving model of instruction in science education. *Science Education*, 73(5), 523-534.
- Planck, M. (1887). *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*. Leipzig: Teubner.
- Plantin, C. (2005). *L'argumentation : histoire, théories, perspectives*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Plantin, C. (2016). *Dictionnaire de l'argumentation : une introduction aux études d'argumentation*. ENS Editions.
- Poincaré, H. (1921). *Des fondements de la géométrie*. Paris : Etienne Chiron.
- Poincaré, H. (1968 [1902]). *La science et l'hypothèse*. Paris : Flammarion.
- Poincaré, H. (1970 [1905]). *La valeur de la science*. Paris : Flammarion.
- Popper, K. (1973 [1935]). *La logique de la découverte scientifique* (tr. fr.). Paris : Payot, 1973
- Popper, K. (1992). *Un univers de propensions, deux études sur la causalité et l'évolution* (tr. fr.). Paris : Editions de l'Éclat.
- Posner, G., Strike, K., Hewson, P. & Gertzog, W. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Psarros, N. (1998). What has philosophy to offer to chemistry? *Foundations of Science*, 1, 183-202.
- Psillos, S. (1999). *Scientific realism: How science tracks truth*. London & New York: Routledge.
- Putnam, H. (1975). *Philosophical Papers, vol. 1*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Putnam, H. (1984 [1981]), *Raison, vérité et histoire* (tr. fr.). Paris : Les éditions de Minuit.
- Putnam, H. (1995). *Pragmatism: An Open Question*, Oxford and Cambridge (Mass.): Blackwell.
- Quine, W. (1975). On Empirically Equivalent Systems of the World. *Erkenntnis*, 9(3), 313-328.
- Quine, W. (1977 [1960]). *Le mot et la chose* (tr. fr.). Paris : Flammarion.
- Rankine, W. (1855). *Outlines of the science of energetics*. The Edinburgh New Philosophical Journal, July-October 1855, Vol. II, 3, 121-141.
- Reverdy, C. (2016). La coopération entre élèves : des recherches aux pratiques. *Dossier de veille de l'IFÉ* n° 114.
- Richardson, V. & Placier, O. (2001). Teacher change. In V. Richardson (ed.), *Handbook of research on teaching* (p. 905-947), Washington: American Educational Research Association
- Rizaki, A. & Kokkotas, P. (2013). The use of history and philosophy of science: as a core for a socioconstructivist teaching approach of the concept of energy in primary education. *Science & Education*, 22, 1141-1165.
- Robardet, G. & Guillaud, J.-G. (1995). *Éléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques: de la recherche à la pratique*. Grenoble : Publications de l'IUFM de Grenoble.
- Robardet, G. (1990). Enseigner les sciences physiques à partir de situations-problèmes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 84, 17-28.

- Robardet, G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? Notion de situation-problème. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 95, 1173-1190.
- Robert, A. (2008). Sur les apprentissages des élèves : Une problématique inscrite dans les théories de l'activité et du développement. In F. Vandebrouck (Ed.), *La classe de mathématiques : Activités des élèves et pratiques des enseignants* (p.33-44). Toulouse : Octarès.
- Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Walberg-Henriksson, H. & Hemmo, V. (2007). *Science education now: a renewed pedagogy for the future of Europe*. Brussels: Directorate General for Research, European Commission.
- Rudge, D. & Howe, E. (2009). An explicit and reflective approach to the use of history to promote understanding of the nature of science. *Science & Education*, 18(5), 561-580.
- Rudge, D., Cassidy, D., Fulford, J. & Howe E. (2013). Changes observed in views of nature of science during a historically based unit. *Science & Education*, published online January 2013.
- Sadler, T. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(5), 513-536.
- Sadler, T. D., & Fowler, S. R. (2006). A Threshold Model of Content Knowledge Transfer for Socioscientific Argumentation. *Science Education*, 90(6), 986-1004.
- Sampson, V. & Clark, D. (2008). The impact of collaboration on the outcomes of scientific argumentation. *Science Education*, 93(3), 448-484.
- Sandoval, W. (2013). Educational design research in the 21st century. In R. Luckin, J. Underwood, N. Winters, P. Goodyear, B. Grabowski & S. Puntambekar (eds.), *Handbook of design in educational technology* (p. 388-396), London: Taylor & Francis.
- Santini, J. (2009). Les conceptions des élèves : des données empiriques aux résultats inférés. Questionner l'implicite d'un objet des didactiques à partir des conceptions du mécanisme sismique. In C. Cohen-Azria, & N. Sayac (eds), *Questionner l'implicite. Les méthodes de recherche en didactiques 3* (p. 227-242). Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.
- Schlick, M. (1932-33). Positivismus und Realismus. *Erkenntnis*, 3, 1-31.
- Schummer, J. (1998). The chemical core of chemistry I: a conceptual approach, *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 2, 129-162.
- Schummer, J. (2006). The philosophy of chemistry: from infancy toward maturity. In D. Baird, E. Scerri & L. McIntyre (eds.), *Philosophy of chemistry* (p. 19-39). Dordrecht: Springer.
- Schütt, H.-W. (2003). Chemical atomism and chemical classification. In M.J. Nye (ed.), *The Cambridge history of science, vol. 5: the modern physical and mathematical sciences* (p. 237-254). Cambridge: Cambridge University Press.
- Schwarz, B. & Baker, M. (2017). *Dialogue, argumentation and education: history, theory and practice*. New York: Cambridge University Press.
- Scotto d'Apollonia, L. (2017). L'éducation aux « controverses climatiques » : une fabrique du doute ? In M. Bächtold, V. Durand-Guerrier & V. Munier (eds.) (2017). *Epistémologie et didactique : synthèses et études de cas en mathématiques et en sciences expérimentales* (p. 249-259), Presses Universitaires de Franche-Comté.
- Selleri, F. (1994). *Le grand débat de la théorie quantique* (tr. fr.). Paris : Flammarion.
- Sexl, R. (1981). Some observations concerning the teaching of the energy concept. *European Journal of Science Education*, 3(3), 285-289.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
- Simões, A. (2003). Chemical physics and quantum chemistry in the twentieth century. In M.J. Nye (ed.), *The Cambridge history of science, vol. 5: the modern physical and mathematical sciences* (p. 394-412). Cambridge: Cambridge University Press.
- Simonneaux, L. (2007). Argumentation in Socio-Scientific Contexts. In S. Erduran & M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education* (p. 179-199). Springer.
- Simonneaux, L., & Simonneaux, J. (2005). Argumentation sur des questions socioscientifiques. *Didaskalia*, 27, 79-108.

- Simonneaux, L., & Simonneaux, J. (2011). Argumentations d'étudiants sur des Questions Socialement Vives environnementales. *Formation et pratiques d'enseignants en question*, 13, 157-178.
- Smith, C. (2003). Force, energy, and thermodynamics. In M. J. Nye (ed.), *The Cambridge history of science: the modern physical and mathematical sciences* (p. 289-310). Cambridge: Cambridge University Press.
- Soler, L., Zwart, S., Lynch, M. & Israel-Jost, V. (eds.) (2014). *Science after the Practice Turn in the Philosophy, History, and Social Studies of Science*. Routledge.
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: how pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5, 49-59.
- Solomon, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20, 165-170.
- Solomon, J. (1994). The rise and fall of constructivism. *Studies in Science Education*, 23, 1-19.
- Stapp, Henry Pierce, 1972, "The Copenhagen Interpretation", *American Journal of Physics*, 40(8), 1098–1116.
- Stöltzner, M. & Übel, T. (eds.) (2006). *Wiener Kreis. Texte zur wissenschaftlichen Weltauffassung von Rudolf Carnap, Otto Neurath, Moritz Schlick, Philipp. Frank, Hans Hahn, Karl Menger, Edgar. Zilsel und Gustav Bergmann*. Hamburg: Meiner.
- Teller, P. (1995). *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*. Princeton: Princeton University Press.
- Thomson, W. (1851). On the dynamical theory of heat: with a numerical result deduced from Mr Joule's equivalent of a thermal unit, and M. Regnault's observations on steam. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 3, 48-52.
- Thomson, W. (1852). On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh for April 19, 1852*.
- Toulmin, S. (1958). *The uses of argument*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Trellu, J.-L. & Toussaint, J. (1986). La conservation, un grand principe. *Aster*, 2, 43-87.
- Tricot, A., Bächtold, M., Bellue, S., Bouguen, A., Cross, D., Djerioua, H., Gurgand, M., Molvinger, K. & Munier, V. (2017). Comment évaluer les acquis des élèves en sciences ? Le cas du projet FORMSCIENCES. *Colloque « Evaluation de l'enseignement fondé sur investigation du raisonnement scientifique et de l'esprit critique : état des lieux et perspectives pour l'avenir »*, Paris.
- Truesdell., C. (1980). *The tragicomical history of thermodynamics (1822-1854)*. New York, Heidelberg, Berlin: Springer.
- Trumper, R. (1990). Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept, part one. *International Journal of Science Education*, 12(4), 343-354.
- Trumper, R. (1991). Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept, part two. *International Journal of Science Education*, 13(1), 1-10.
- Trumper, R. (1993). Children's energy concepts: a cross-age study. *International Journal of Science Education*, 15, 139-148.
- Tsai, C.-C. (2002). Nested epistemologies: science teachers' beliefs of teaching, learning and science. *International Journal of Science Education*, 24(8), 771-783.
- Tyson, L., Venville, G., Harrison, A. & Treagust, D. (1997). A multidimensional framework for interpreting conceptual change events in the classroom. *Science Education*, 81(4), 387-404.
- Van Dijk, E. (2014), Understanding the Heterogeneous Nature of Science: A Comprehensive Notion of PCK for Scientific Literacy. *Science Education*, 98(3), 397-411
- Van Fraassen, B. (1980). *The Scientific Image*. Oxford: Oxford University Press.
- Van Fraassen, B. (1991). *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Oxford: Clarendon Press.
- Van Huis, C. & van den Berg, E. (1993). Teaching energy: a systems approach. *Physics Education*, 28, 146-153.
- Vatin, F. (2010). Travail. In D. Lecourt (ed.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (p. 1109-1114). Paris : Presses Universitaires de France.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary mechanics. *European Journal of Science Education*, 1 (2), 205-221.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique: la part du sens commun*. Bruxelles: De Boeck.

- Villarroel, C., Felton, M. & Garcia-Mila M. (2016). Arguing against confirmation bias: the effect of argumentative discourse goals on the use of disconfirming evidence in written argument. *International Journal of Educational Research*, 79, 167-179.
- Vince, J. & Tiberghien, A. (2012). Enseigner l'énergie en physique à partir de la question sociale du défi énergétique. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6(1), 89-124.
- Von Glasersfeld, E. (1995). *Radical constructivism: a way of knowing and learning*. London, Washington: The Falmer Press.
- Von Glasersfeld, E. (1998 [1989]). Cognition, construction of knowledge and teaching. In M. Matthews (ed.), *Constructivism in science education: a philosophical examination* (pp. 11-30), Dordrecht, Boston and London: Kluwer.
- Von Glasersfeld, E. (2005). Introduction : aspects of constructivism. Dans C. T. Fosnot (ed.), *Constructivism : theory, perspectives, and practice* (pp. 3-7). New York et Londres : Teachers College Press.
- Von Weizsäcker, C. (1985). *Aufbau der Physik*. München: Carl Hanser Verlag.
- Vosniadou, S. & Ioannides, C. (1998). From conceptual change to science education: a psychological point of view. *International Journal of Science Education*, 20 (10), 1213-1230.
- Vygotski, L. (1997 [1934]). *Pensée et langage* (tr. fr.). Paris : La dispute.
- Walton, D. (2010). Why Fallacies Appear to be Stronger Arguments than They Are. *Informal Logic*, 30(2), 159-184.
- Warren, D. (1998). Kant and the Apriority of Space. *Philosophical Review*, 107, 179-224.
- Warren, J. (1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4(3), 295-297.
- Warren, J. (1991). The teaching of energy. *Physics Education*, 26(1), 8-9.
- Warren, J. (1976). The mystery of mass-energy. *Physics Education*, 11(1), 52-54.
- Waters-Adams (2006). The Relationship between Understanding of the Nature of Science and Practice: The influence of teachers' beliefs about education, teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 28(8), 919-944.
- Watts, D. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18, 213-217.
- Weinstock, M., Neuman, Y. & Glassner, A. (2006). Identification of informal reasoning fallacies as a function of epistemological level, grade level, and cognitive ability. *Journal of Educational Psychology*, 98, 327-334.
- White, R. & Gunstone, R. (1989). Metalearning and conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, 577-586.
- Wittgenstein, L. (1961 [1921]). *Tractatus logico-philosophicus* (tr. fr.). Paris : Gallimard.
- Worrall, J., (1989). Structural realism: the best of both worlds? *Dialectica*, 43, 99-124.
- Yacoubian, H. & Boujaoude, S. (2010). The effect of reflective discussions following inquiry-based laboratory activities on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(10), 1229-1252.
- Zeidler, D. L. (1997). The central role of fallacious thinking in science education. *Science Education*, 81, 483-496.
- Zeidler, D. L., Lederman, N. G., & Taylor, S. C. (1992). Fallacies and Student Discourse: Conceptualizing the Role of Critical Thinking in Science Education. *Science Education*, 76(4), 437-450.
- Zeidler, P. (2000). The Epistemological Status of Theoretical Models of Molecular Structure, *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 6, 17-34.
- Zohar, A., & Nemet, F. (2002). Fostering Student's Knowledge and Argumentation Skills Through Dilemmas in Human Genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(1), 35-62.
- Zurek, W. (1981). Pointer Basis of Quantum Apparatus: Into what Mixture does the Wave Packet Collapse? *Physical Review D*, 24, 1516-1525.
- Zurek, W. (1982). Environment-induced Superselection Rules. *Physical Review D*, 26, 1862-1880.
- Zurek, W. (1991). Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. *Physics Today*, 44, 36-44.