Les démarches de chercheurs en physique et en mathématiques. Enjeux didactiques d'une nouvelle approche épistémologique

Research processes in Physic and Mathematics. Didactic issues of a new epistemological approach

Suzane El Hage et Cécile Ouvrier-Bufferet

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/ree/1932>

DOI : 10.4000/ree.1932

ISSN : 1954-3077

Éditeur

Nantes Université

Référence électronique

Suzane El Hage et Cécile Ouvrier-Bufferet, « Les démarches de chercheurs en physique et en mathématiques. Enjeux didactiques d'une nouvelle approche épistémologique », *Recherches en éducation* [En ligne], 34 | 2018, mis en ligne le 01 novembre 2018, consulté le 09 mars 2022. URL : <http://journals.openedition.org/ree/1932> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ree.1932>

Recherches en éducation est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Les démarches de chercheurs en physique et en mathématiques. Enjeux didactiques d'une nouvelle approche épistémologique

Suzane El Hage & Cécile Ouvrier-Bufferet¹

Résumé

Les démarches d'investigation et d'enquête sont généralement présentées comme dérivées des démarches scientifiques. Dans cet article, nous interrogeons l'épistémologie utilisée par les didacticiens des sciences et des mathématiques dans ce cadre, et nous montrons la nécessité d'adopter une nouvelle posture épistémologique en didactique pour enrichir les recherches portant sur l'enseignement des démarches scientifiques en classe de sciences et de mathématiques. En particulier, nous questionnons les démarches de recherche de chercheurs contemporains, en mathématiques et en physique, et cherchons à les modéliser dans une visée comparatiste. L'outil théorique retenu (modèle de conceptions) est démontré comme opérationnel et transdisciplinaire. Les résultats rapportés dans cet article montrent, notamment, des convergences et divergences entre les chercheurs des deux champs disciplinaires et apportent de nouvelles questions pour la recherche en didactique des sciences et des mathématiques pour la transposition et l'implémentation en classe de démarches scientifiques.

Depuis les années 2000, les textes officiels préconisent un enseignement fondé sur l'investigation scientifique, tant en sciences qu'en mathématiques. Cela est maintenu dans les derniers programmes en France (2015) et apparaît sous une étiquette plus générale de « pratique de démarches scientifiques ». En arrière-plan, on retrouve la nécessité de préparer de futurs citoyens et l'importance de donner une image authentique du fonctionnement des sciences aux élèves. Jean-Marie Boilevin (2013b) nous rappelle que ce type d'enseignement (les démarches d'investigations, notées DI par la suite) est proposé pour résoudre le problème de désaffection des jeunes pour les études scientifiques, pointé dans des rapports européens tels Eurydice (2006) et Michel Rocard et al. (2007). Aujourd'hui, la question didactique de l'éducation scientifique des citoyens, des élèves, des étudiants se pose de manière cruciale, en classe mais aussi hors classe (dans la société) (Hazelkorn & al., 2015). À l'heure où les préoccupations de la société se tournent vers l'éducation scientifique, comment l'école et l'université peuvent permettre aux apprenants de construire une posture scientifique qui leur sera utile en tant que futurs citoyens, mais aussi futurs professionnels ? Nous pensons aujourd'hui que les didacticiens des mathématiques et des sciences doivent s'emparer de ces vastes questions et de la perspective sociétale qu'elles apportent.

Les DI (en France, sous ces différentes déclinaisons), l'IBE (Inquiry-Based Education) et l'IBSME (Inquiry-Based Science and Mathematics Education) représentent une pratique de classe qui est aujourd'hui une institution à elle seule dont nous pouvons et devons (ré)interroger l'épistémologie. En effet, les didacticiens des sciences explorent et analysent depuis plusieurs années cette modalité d'enseignement et d'apprentissage selon différents angles d'attaque, notamment : typologie des DI (Morge & Boilevin, 2007), compréhension des mécanismes sous-tendant l'implémentation d'investigations en classe (Calmettes, 2012 ; Boilevin, 2013a ; Cross & Grangeat, 2014 ; Jameau & Boilevin, 2015) ; caractérisation de l'authenticité des DI par une analyse historique et épistémologique des démarches en sciences (Cariou, 2011) ; étude de l'efficacité des DI (Cross & Grangeat, 2014) ; étude de l'écart entre le prescrit et la mise en œuvre effective en classe (par exemple, Mathé, 2010) ; conception de ressources en physique (Tiberghien, 2011) ; difficultés de mise en œuvre (Boilevin & al., 2016), etc. Nous allons retenir à partir de maintenant plus particulièrement le domaine de la physique. Les didacticiens des mathématiques, quant à eux, poursuivent les recherches en termes de types de situations

¹ Suzane El Hage, maître de conférences & Cécile Ouvrier-Bufferet, professeur d'université, Centre d'Études et de Recherches sur les Emplois et les Professionnalisations (CEREP), Université de Reims Champagne-Ardenne.

(situations-problèmes, problèmes ouverts, situations-recherche, etc., par exemple, Hersant, 2012 ; Grenier & Payan, 2003) et de dispositifs propices à la mise en œuvre d'une démarche scientifique « à l'image » de celle des chercheurs (tels ceux des équipes de recherche *Maths à Modeler* (alliant didacticiens et mathématiciens) et *Dream* (regroupant didacticiens, mathématiciens et enseignants).

Dans ce contexte, les didacticiens en physique et en mathématiques adoptent des postures épistémologiques qui orientent leurs choix en termes d'objets d'étude et guident leurs recherches en termes de « démarche scientifique ». Ces éléments épistémologiques sont parfois sous-jacents et nous souhaitons les interroger. En effet, nous faisons l'hypothèse qu'une étude se situant dans l'épistémologie contemporaine des pratiques de recherche des physiciens et mathématiciens professionnels peut permettre une actualisation et un enrichissement des arrière-plans épistémologiques des recherches conduites en didactique de la physique et des mathématiques. L'idée est bien ici de prendre appui sur une telle épistémologie contemporaine pour conduire de nouvelles propositions d'enseignement pour les « démarches scientifiques » au sens large dans les classes, avec une visée commune en physique et en mathématiques. Ainsi, notre questionnement de recherche est le suivant :

- quel modèle théorique serait opérationnel pour rendre compte et comparer des démarches de recherche contemporaines de physiciens et mathématiciens professionnels ?
- quelles implications didactiques seraient générées par le choix d'un tel modèle théorique ?

Nous proposons donc, dans cet article, une méthodologie pour décrire et comparer des démarches de recherche de physiciens et mathématiciens, à un niveau épistémologique. Nous rappellerons tout d'abord le contexte épistémologique usuel des didacticiens afin d'en souligner les traits saillants, en sciences, en mathématiques, mais aussi à l'interface entre ces deux champs disciplinaires. Nous définirons ensuite la posture épistémologique que nous adoptons pour entrer dans la caractérisation des démarches de recherche de chercheurs contemporains. Nous présenterons les raisons du choix d'un outil théorique (modèle cKc), à fortes potentialités transdisciplinaires, qui nous permettra d'analyser et comparer des discours de chercheurs en mathématiques et en physique relatant leur pratique de la recherche. Nous pourrions ainsi ouvrir la discussion sur les implications didactiques de cette étude.

1. Contexte épistémologique des didacticiens des sciences et des mathématiques

Nous présentons ici les grandes lignes d'une synthèse des référents épistémologiques utilisés par des chercheurs en didactique travaillant sur les DI depuis 2009 (date retenue au vu des évolutions des programmes en mathématiques et en sciences quant aux « démarches scientifiques »). Nous avons examiné essentiellement des articles en lien avec les programmes français dans des revues francophones et anglo-saxonnes proches de la communauté des didacticiens français. Certains articles s'inscrivent explicitement dans une logique épistémologique, ce sont ces derniers qui nous intéressent le plus ici.

■ En sciences

Même si toutes les recherches en didactiques des sciences n'ont pas une définition partagée sur ce que recouvrent les DI (Grangeat, 2013), nous pouvons remarquer une démarcation entre les mondes anglo-saxon et francophone par rapport aux référents historiques et épistémologiques, avec Gaston Bachelard et une méthode hypothético-déductive en France, et l'enquête (*inquiry*) (Dewey, 1993) dans le monde anglo-saxon. Nous avons remarqué que les épistémologues et grands « référents » usuellement cités en sciences, dans les recherches françaises, sont : John Dewey, Gaston Bachelard, Georges Canguilhem, Karl Popper, Thomas Kuhn et Henri Poincaré. Trois axes se dessinent :

- l'entrée par **les problèmes**² : à titre d'exemple, Martinez Barrera, Cécile De Hosson et Nicolas Décamp (2015) défendent l'idée que la production de savoir en sciences relève autant de la construction des problèmes que de leur résolution. Cela s'inscrit dans un courant de pensée de la communauté des didactiques des sciences faisant appel à Jean-Louis Martinand, Michel Fabre et Christian Orange, et ce en continuité avec les travaux de Bachelard mais aussi Dewey ;
- Jean-Yves Cariou (2015) insiste sur le rôle de l'**hypothèse** dans les DI, en lien direct avec l'esprit scientifique ; il s'appuie pour cela sur Popper (1979) mais aussi sur Poincaré (1905) pour argumenter sur le besoin de développer l'**esprit créatif** et l'**esprit de contrôle** ;
- Magali Hersant et Denise Orange-Ravachol (2015) étudient la définition des DI entre mathématiques et sciences. Elles s'intéressent à l'**expérience** et aux modalités de **validations de l'hypothèse** (Poincaré et Popper) comme démarcation entre ces deux disciplines. Leurs travaux se situent dans le cadre de la problématisation pour repenser l'investigation comme une enquête scientifique.

Ainsi, les travaux sur les problèmes et la problématisation convoquent essentiellement Bachelard et Dewey, ceux autour des hypothèses en réfèrent à Popper, et ceux portant sur les modalités de validation des hypothèses en appellent à Popper et Poincaré pour expliquer que la corroboration de l'hypothèse ne suffit pas et qu'un autre type de preuve est nécessaire.

■ En mathématiques

Michèle Artigue et Katja Maaß (2013) notent que l'investigation en mathématiques peut avoir différentes interprétations au sein d'une même discipline : « The existence of such definitions does not exclude the co-existence of different interpretations of inquiry-based learning, as these not only result from differences between scientific disciplines » (p.781). Cette affirmation est essentiellement basée sur des références institutionnelles (National Research Council, 2000).

Les épistémologues usuellement cités par les didacticiens des mathématiques, directement, ou indirectement par référence à d'autres travaux de recherche, sont : Popper, Kuhn, Bachelard, Dewey, Lakatos, Pólya, Fleck, Hacking (voir par exemple les numéros spéciaux sur l'IBE et les DI de *ZDM - The International Journal on Mathematics Education*, Maaß & al., 2013, et de *Recherches en Éducation*, Calmettes & Matheron, 2015). Les fondements de l'école française en didactique des mathématiques se trouvent culturellement dans l'épistémologie et trouvent leurs sources dans l'activité mathématique elle-même (la théorie des situations didactiques de Brousseau, 1986 ; la dialectique outil/objet et les jeux de cadres de Douady, 1986, en sont les principaux exemples). Bachelard en est l'un des piliers, en particulier avec la notion d'obstacle épistémologique. Notons au passage les récents outils proposés par la théorie anthropologique du didactique, en particulier le schéma herbatien qui permet d'intégrer une perspective dynamique de modélisation de processus de recherche (voir par exemple Bosch & Winsløw, 2015, pour une illustration des potentialités du schéma herbatien dans la dynamique des processus d'étude et de recherche). Par ailleurs, les travaux d'Imre Lakatos et George Pólya s'inscrivent dans un mouvement fort autour du *problem-solving* et cherchent à rendre compte de l'activité mathématique. Ainsi, ils servent d'appui aux didacticiens travaillant sur l'implémentation d'une activité de recherche en classe basée sur des problèmes mathématiques en lien avec la recherche contemporaine elle-même (c'est le cas des groupes de recherche *Maths à Modeler* et *Dream* notamment). Le lien avec Popper peut être fait ici, car il représente l'un des fondements des travaux de Lakatos, et de certains didacticiens. De plus, Ludwik Fleck, notamment, représente une référence à un courant de pensée relatif à la non-linéarité et à la complexité de l'histoire des sciences, situant la démarche scientifique dans une dimension collective. Nous pourrions parler de même des références faites à un courant de pensée marqué par Kuhn, ou plus récemment Hacking du côté de la sociologie des sciences.

² Ce qui est surligné en gras indique l'entrée choisie par ces chercheurs.

■ **À l'intersection sciences/mathématiques**

Un des points qui suscite des débats, dans la littérature en didactique, concerne les positions de Dewey (1993) et Bachelard (1938) que certains rapprochent ou opposent. Nous évoquerons ici essentiellement les travaux de Michel Fabre (2009) et ceux portant sur le développement d'une épistémologie de la problématisation, initialement ancrée en didactique des sciences et reprise localement en didactique des mathématiques. Fabre (2009, p.115) présente la problématisation comme « une pensée contrôlée par des normes ». Il souligne par ailleurs qu'effectivement Dewey et Bachelard s'accordent sur les caractéristiques générales de la problématisation et analyse les points de divergence. Ainsi, la continuité telle qu'elle est pensée par Dewey se distingue de la dialectique entre ruptures et continuités de Bachelard. Au niveau épistémologique toujours, Stéphanie Mathé (2010) rappelle les catégories dichotomiques de problèmes en sciences (Kuhn, 1962 ; Laudan, 1977 ; Hacking, 1984) afin de souligner la restriction faite dans les programmes. La question de la transposition des problèmes et les types mêmes de problèmes de la recherche scientifique vers la classe reste donc cruciale, nous y reviendrons.

Les référents épistémologiques convoqués par les didacticiens des mathématiques ont ainsi essentiellement deux fonctions, que l'on retrouve en didactique des sciences :

- s'inscrire dans des courants de pensées partagées dans la communauté ;
- développer une épistémologie spécifique à visée didactique, telle que celle de la problématisation ou celle des Situations de Recherche pour la Classe (Grenier & Payan, 2003).

Par ailleurs, ces vingt dernières années ont été marquées par des évolutions technologiques et scientifiques conséquentes qui se sont diffusées dans les programmes officiels et dans les classes, tout comme la demande institutionnelle sur l'éducation scientifique du citoyen et la formation aux « démarches scientifiques ». Le rapport au savoir est très probablement lui aussi en évolution : une actualisation des connaissances épistémologiques des chercheurs en didactique serait ainsi profitable dans le contexte actuel, ce qui nous amène à préciser la posture épistémologique que nous adoptons pour conduire un travail comparatiste entre physique et mathématiques.

■ **Notre posture épistémologique pour étudier les démarches de recherche**

L'évolution de la science qui se pratique nécessite un changement de posture épistémologique pour les chercheurs en didactique, et c'est là notre hypothèse de travail (El hage & Plé, 2016). Les relations et rapports entre les sciences se complexifient au fil du temps, se diversifiant ; de nouvelles branches des sciences apparaissent. Nous souhaitons donc nous placer au sein de l'épistémologie contemporaine³ pour analyser le savoir scientifique d'aujourd'hui et accéder ainsi à un nouvel outil épistémologique d'analyse de la science qui s'enseigne. Ainsi, dans le cas plus particulier des DI, objets des programmes officiels, mais aussi moyens d'enseignement (voir par exemple Mathé, 2010) dont les fondements épistémologiques sont dictés par de brillants travaux scientifiques du XX^e siècle, une question d'actualité se pose : pourquoi et comment pouvons-nous caractériser des conceptions de chercheurs contemporains sur leur propre démarche de recherche ? Pouvons-nous construire un outil épistémologique actualisé, commun aux mathématiques et aux sciences pour questionner et enrichir les pratiques en classe des « démarches scientifiques » ? Pour le traitement de ces questions, nous adoptons une posture épistémologique classique, en continuité avec les travaux précédents en didactique de la physique et des mathématiques. Nous conservons à l'esprit, en effet, l'importance des problèmes dans l'activité de recherche en physique et en mathématiques et de la problématisation, ainsi que l'étude de la place et du rôle de l'expérience dans ces deux disciplines, et les modes de

³ L'adjectif *contemporain* renvoie ici à la référence particulière que nous souhaitons donner de notre étude, à savoir la pratique des chercheurs *in statu nascendi*. Pour des raisons méthodologiques, nous ne conduirons pas une étude de chercheurs en train de chercher (ce qu'a fait par exemple Gardes, 2013, dans sa thèse auprès d'un chercheur « en action » et d'un autre chercheur à partir de ses publications).

validation possibles (validation de démarches mais aussi de résultats). Le choix d'un outil théorique pertinent au niveau épistémologique et permettant de faire des inférences didactiques est ainsi en partie guidé par la posture que nous adoptons ici.

2. Le modèle cKc des conceptions : présentation et utilisation

■ *Un modèle à potentialités transdisciplinaires*

Il s'agit pour nous d'étudier la pluralité des points de vue épistémologiques sur les démarches propres à la recherche en mathématiques et en physique. Pour cela, il est nécessaire d'interroger et d'observer les chercheurs que nous prenons comme référence pour « ceux qui font la science ». L'observation des chercheurs « en train de chercher » nécessite un travail conséquent, c'est pourquoi nous ne l'avons pas réalisé pour l'instant, mais envisageons de le conduire ultérieurement (à l'image du travail de Gardes, 2013) à partir d'un travail préalable que nous présentons ici. Nous traiterons ici d'entretiens réalisés auprès de chercheurs. Se pose ainsi à nous une problématique de nature méthodologique : quel outil théorique retenir afin de modéliser les conceptions de chercheurs décrivant leur propre démarche de recherche mais aussi de comparer ces conceptions, en mathématiques et en physique ?

La question de la modélisation des conceptions en didactique est d'une complexité non encore résolue aujourd'hui. Pour mémoire, Guy Brousseau (1986) a décrit un premier « modèle » de conception, où sont mis en évidence deux éléments : un ensemble de règles, pratiques et savoirs pour résoudre une classe de situations ou de problèmes, et le domaine de validité de cet ensemble. Dans le prolongement de Gérard Vergnaud (1991), la caractérisation proposée par Michèle Artigue (1991) pour un concept trouve son analogue du côté des conceptions du sujet. Mais demeure alors la complexité de son usage, complexité déjà soulignée par les didacticiens de l'époque. Nous retiendrons ici plus particulièrement le modèle cKc (conception, connaissance, concept) de Nicolas Balacheff (1995, 2003) car il a une potentialité réelle du côté épistémologique, mais aussi du côté didactique et cognitif (l'origine de ce modèle se trouve en effet dans le triplet de Vergnaud, 1991). Il est aussi transdisciplinaire, ce que la présentation de ce modèle, qui suit, démontre.

Les travaux de Balacheff (1995) s'inscrivent dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques de Brousseau (1986). Il considère le système [Sujet <> Milieu], et insiste sur le fait qu'une conception est une propriété émergente des interactions au sein de ce système. Une conception est alors définie comme une « modélisation cognitive rendant compte des régularités des conduites d'un sujet relativement à un cadre » (Balacheff, 1995, p.228). Dans le modèle de Balacheff (1995), deux niveaux d'invariants opératoires⁴ interviennent : les opérateurs (R) qui permettent d'agir sur la situation, et les structures de contrôle (Σ) qui justifient et valident l'utilisation des opérateurs, ou encore permettent de décider si un problème est résolu ou non. Une dialectique forte, voire même une perméabilité, existe entre ces deux types d'invariants, ce que nous pointerons ci-après. Balacheff (1995, 2003) a en fait apporté trois points essentiels à la modélisation déjà existante des conceptions selon Vergnaud (1991) :

- il a repris le triplet de Vergnaud (1991) et a ajouté une « structure de contrôle » qui s'est révélée nécessaire en particulier lors de l'exploration de conceptions dans des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH), mais qui, depuis, a montré son intérêt dans l'analyse de concepts et de processus ;
- il a introduit la notion de μ -conception (voir ci-après) pour accéder à un savoir de référence (Balacheff & Margolinas, 2005) ;
- il a démontré l'accessibilité à la caractérisation de savoirs et connaissances via la détermination de conceptions.

⁴ Les invariants opératoires relèvent du « signifié » (Vergnaud, 1991).

Une conception est en fait décrite par un quadruplet (P, R, L, Σ) où :

- P est un ensemble de problèmes sur lesquels la conception est opératoire (Vergnaud rappelle qu'en mathématiques, les problèmes sont sources et critères du savoir) ; P décrit le domaine de validité de la conception. P est du côté de la sphère de pratique.
- R est un ensemble d'opérateurs. Ceux-ci permettent la transformation des problèmes. Ils sont attestés par des productions et des comportements du sujet.
- L est un système de représentation qui permet d'exprimer les éléments de P et de R. À l'image du modèle proposé par Vergnaud, les éléments de L sont langagiers ou non.
- Σ est une structure de contrôle qui donne et organise les fonctions de décision, de choix, de jugement de validité et d'adéquation de l'action. La structure de contrôle assure la non-contradiction de la conception. Les contrôles sont des outils de décision sur la légitimité de l'usage d'un opérateur et sur l'état du problème (résolu ou non).

Notons que les structures de contrôle sont souvent implicites, ce qui les rend difficiles à déterminer et à observer. C'est, par ailleurs, à ce niveau des structures de contrôle que Balacheff (1995) place les connaissances stratégiques (Artigue, 1993) et les métaconnaissances (Robert & Robinet, 1996) spécifiques d'une classe de problème sur lesquelles nous reviendrons lors de la présentation des résultats. De plus, Balacheff (2013) insiste sur le fait que le modèle cK ϕ peut être enrichi par d'autres cadres théoriques (tels que ceux relatifs à la sémiotique), notamment pour la description des systèmes de représentation et des structures de contrôle.

À titre d'exemple, Balacheff & Margolinas (2005, p.27) proposent l'illustration suivante de l'utilisation du modèle. Ils considèrent l'ensemble des problèmes (P) « activité familière de mesure », auquel sont associés les opérateurs (R) « manipulation des instruments, arithmétique élémentaire » et les structures de contrôle (Σ) relevant de « règles de l'art, ordres de grandeur, contrôles perceptivo-gestuels et instrumentés ». Ici le système de représentation (L) concerne à la fois le dessin géométrique (et la constitution associée des objets dans le champ spatiographique) et la représentation numérique avec un traitement spécifique, ainsi que des gestes. Ce niveau de description d'une conception permet de s'interroger maintenant sur un problème mathématique plus « petit » tel que « Quelle est la somme des angles d'un triangle ? » avec pour but de déstabiliser et faire évoluer cette conception, et ainsi envisager une progression de situations qui permettra de motiver le « passage d'un invariant spatiographique à la propriété géométrique, de l'évidence instrumentée à la démonstration », ou à la problématique de la preuve » (Balacheff & Margolinas, 2005, p.28). Nous voyons ici l'intérêt théorique du modèle pour le « calcul » des situations didactiques (au sens de Balacheff).

Dans le cadre d'une problématique cherchant à décrire les processus mobilisés par des chercheurs professionnels, ce modèle peut être utilisé à un niveau historique pour baliser l'activité de chercheurs professionnels (*via* leurs écrits qui nous sont parvenus) et l'évolution de cette activité au cours des siècles, ce qui constitue un projet de recherche conséquent. Ce travail a été partiellement réalisé, grâce au modèle cK ϕ , au niveau épistémologique, sur une partie de l'activité de recherche du mathématicien à savoir l'activité de définition (Ouvrier-Buffet, 2013) via des μ -conceptions emblématiques et des entretiens avec des chercheurs contemporains pour apporter un nouvel éclairage didactique sur les processus d'apprentissage en mathématiques. Balacheff (2013) pointe justement l'intérêt d'analyser l'histoire des mathématiques et les pratiques actuelles des mathématiciens : nous nous inscrivons clairement dans cet objectif. Le modèle de Balacheff a par ailleurs été utilisé avec succès, par exemple dans des travaux récents de modélisation des conceptions relatives à des objets tels que l'algorithmique (Modeste, 2012), objet ayant fait son entrée dans les programmes et spécifique d'une activité à l'interface entre mathématiques et informatique contemporaine.

Revenons maintenant sur la notion de μ -conceptions. Dans tous travaux de didactique, il est nécessaire de considérer des conceptions « de référence » qui font autorité, impliquant les savoirs de référence. Balacheff & Margolinas (2005) précisent que l'accessibilité d'un savoir de référence est avérée par la description de « μ -conceptions », en prenant en compte particulièrement le couple sujet/problèmes. La complexité de notre recherche est d'accéder à

une pratique de chercheurs relevant en grande partie de leur sphère privée. En fait, pour Balacheff (1995), l'univers de référence, noté μ , est l'ensemble des concepts mathématiques (proche du troisième monde de Popper pour les mathématiques). Si on prend l'exemple du concept (ϕ) de « fonction » en mathématiques, il existe plusieurs caractérisations « de référence » (des μ -conceptions dans le savoir savant). Certaines sontinstanciées en connaissances (K) que l'on peut retrouver avec une étude historique chez Newton, Dirichlet, Descartes par exemple. Et enfin, certaines de ces connaissances sontinstanciées en conceptions (c) chez des apprenants, certaines pouvant avoir plusieurs racines et pouvant même être contradictoires.

■ **Notre utilisation du modèle cK ϕ**

Nous considérons donc le niveau des μ -conceptions (Balacheff & Margolinas, 2005) pour décrire l'activité de recherche « déclarée » de chercheurs professionnels en mathématiques et en physique. Notre objectif est bien de rendre compte des invariants de ces pratiques, à un niveau de granularité suffisant pour discuter des perspectives didactiques en classe, lors d'enseignements proches des démarches d'enquête et d'investigation. Ce qui nous intéresse ici est de déterminer des invariants opératoires de μ -conceptions de chercheurs en mathématiques et en physique, et de rechercher les points de convergence et de divergence. Nous allons ainsi nous concentrer sur les opérateurs et structures de contrôle. Ceux-ci attestent de comportement d'un sujet relativement à une classe de problèmes. Décrire précisément cette classe de problèmes, *a priori* très large (par exemple, les problèmes de modélisation, d'optimisation, etc.) nécessiterait d'identifier des sous-problèmes et ainsi de suite, jusqu'à parvenir à un niveau de granularité permettant une explicitation exhaustive des conceptions. Par ailleurs, l'identification des problèmes dans les modèles théoriques en didactique des concepts et conceptions est, on le sait bien, toujours complexe. Nous avons décidé de suivre la position pragmatique de Balacheff (2013), ne pouvant traiter tous les problèmes de recherche des deux champs disciplinaires retenus : « A solution familiar to most researchers consists of deriving the description of P from both the observation of students in situations and from the analysis of historical and contemporary practices of mathematics. » (Balacheff, 2013, p.6)

Dans ce contexte théorique, nous avons choisi d'identifier et de retenir des moments-clés communs de l'activité de recherche en mathématiques et en physique, et, relativement à ces moments, de décrire les invariants opératoires afférents. Chaque moment peut être complété par la définition d'objectifs spécifiques. Quant aux systèmes de représentation, ils sont intimement liés aux concepts en jeu et à chaque discipline, et sont utilisés pour représenter les opérateurs et les structures de contrôle relativement à ces concepts. Ils restent ainsi implicites dans notre description. Nous faisons donc l'hypothèse que ce niveau de généralité va nous permettre de décrire des invariants opératoires en nombre suffisant et de qualité pour apporter une première image comparée des pratiques de mathématiciens et physiciens. Cette image pourra servir de base également pour des propositions didactiques, ainsi que pour une étude ultérieure d'observation de chercheurs en train de chercher (suivant une méthodologie proche de celle de Gardes, 2013, par exemple).

■ **3. Méthodologie « transdisciplinaire » maths-sciences**

■ **Recueil de données**

Nous avons procédé par entretiens semi-directifs pour accéder aux « pratiques » déclarées des chercheurs en sciences. Nous avons interviewé pour cette étude treize chercheurs mathématiciens et physiciens (enseignants-chercheurs : professeurs des universités ou directeurs de recherche CNRS, et maîtres de conférences, en parité) issus de différents laboratoires en France. Pour la présentation des résultats, nous retenons ici les entretiens conduits avec sept physiciens : trois dans le champ de la physique théorique, quatre dans des domaines alliant modélisation et/ou expérimentation (modélisation des matériaux de structure ; spectroscopie) et cinq mathématiciens : deux dans le champ des mathématiques appliquées et

de la modélisation et trois travaillant en mathématiques discrètes (théorie des nombres et théorie des graphes). Nous faisons l'hypothèse que ces choix nous assurent de trouver, au sein de chaque discipline, mathématiques et physique, des convergences suffisantes.

L'entretien était structuré en deux parties, l'une sur la recherche et l'autre sur l'enseignement, et durait entre 55 et 80 minutes. Toutes les questions étaient qualitatives et ouvertes : les chercheurs avaient la possibilité de répondre oralement seulement ou avec un support graphique ou textuel en complément.

Dans cet article, nous proposons une méthodologie d'analyse des réponses données à la première partie de l'entretien, c'est-à-dire au sujet des démarches de recherche telles qu'elles sont décrites par les chercheurs. Des questions ont été posées notamment sur : les problèmes, les hypothèses, la preuve, la place et le rôle des écrits, les démarches de recherche elles-mêmes, la nature et le rôle des interactions entre pairs et la/les référence(s) épistémologique(s) des chercheurs (cf. Annexe). Ces questions ont été définies au regard de l'étude préalable des référents épistémologiques des didacticiens, mais aussi en tenant compte de la spécificité des invariants opératoires du modèle cK ϕ . Nous avons en effet fait le choix d'insister sur la définition d'un problème dans l'activité de recherche en physique et en mathématiques, sur l'explicitation d'éléments propres à l'activité de recherche (en termes de moments de travail et de caractéristiques de la démarche lors de l'évolution d'un problème), sur la place et le rôle des expérimentations dans cette démarche, ainsi que sur les moyens de contrôle mis en œuvre dans la recherche. De récentes études en didactique ayant pointé l'intérêt de l'étude du travail écrit et collectif des chercheurs professionnels en mathématiques, nous avons également intégré ce point.

■ *Définir différents moments de l'activité de recherche*

Modéliser par cK ϕ nécessite de définir des problèmes, ce qui est complexe lorsqu'il s'agit de la très vaste activité d'un chercheur. Nous avons choisi d'identifier différents moments de l'activité scientifique et de décrire chacun de ces moments avec le quadruplet (P, R, L, Σ) de cK ϕ , à l'image du travail de Cécile Ouvrier-Buffet (2013) pour modéliser l'activité de définition en mathématiques. Se pose ainsi la question, permanente au niveau épistémologique : comment caractériser différents moments de l'activité de recherche, communs aux mathématiques et à la physique, pour notre visée comparatiste ? La définition de ces moments doit rester cohérente au niveau épistémologique et compatible avec les contextes institutionnel et didactique dans lesquels nous utiliserons les résultats de notre étude. Nous choisissons donc de nous inscrire dans la vision de la méthode scientifique dite traditionnelle : « 1. Make observations - 2. Formulate a hypothesis - 3. Deduce consequences from the hypothesis - 4. Make observations to test the consequences - 5. Accept or reject the hypothesis based on the observations. » (Grandy & Duschl, 2008, p.3).

On retrouve ici la description faite dans des projets européens alliant mathématiques et sciences tels que PRIMAS (2011, p.9) d'une méthode scientifique en six étapes : « Observation and description ; Questioning ; Hypothesis formulation ; Predicting ; Experimenting ; Conclusion ». D'autres étapes sont également présentées sous forme de remarque dans PRIMAS, telles que procéder par essai/erreur, construire des modèles, faire des tests, se documenter. Par ailleurs, Richard Grandy & Richard Duschl (2008) évoquent également la question de « writing about theories ». Insistons sur le fait que le travail sur le problème initial qui génère la démarche est là absent, et pourtant, il est fondamental, comme nous l'avons souligné dans la description de notre posture épistémologique. Ainsi, si un consensus se dégage de ces travaux sur une démarche scientifique « commune » aux mathématiques et aux sciences en cinq ou six étapes, il est toujours possible d'en ajouter. L'utilisation du modèle théorique cK ϕ va nous obliger à faire des choix, et nous allons les faire relativement au niveau de granularité suivant : nous allons définir des moments de travail dans l'activité de recherche suffisamment larges mais reprenant ceux classiquement proposés, dans un consensus maths-physique, et nous allons étudier finement les invariants opératoires, ce qui nous permettra de couvrir l'activité de recherche et d'en rendre compte.

Remarquons que les catégorisations de moments de l'activité de recherche dépendent en fait intrinsèquement des objectifs de la recherche elle-même. La définition des objectifs de ces moments peut permettre de différencier les mathématiques des sciences, en conservant leurs spécificités épistémologiques. C'est ce que proposent Ouvrier-Bufferet, de Hosson, Bosdeveix (2016) dans un travail épistémologique d'intersection entre mathématiques, physique et biologie, en définissant neuf moments communs à ces trois champs disciplinaires. Cette proposition s'accompagne des objectifs des différents moments (adaptables suivant les disciplines) et d'une définition des problèmes par un couple d'instances et de questions, ce qui est novateur dans le domaine de la didactique. La définition des problèmes permet de suivre l'évolution et les transformations du/des problème(s) de départ au cours de la recherche. Ceci se situe aussi dans l'esprit de la problématisation telle que Fabre (2009) la propose, avec « la mise en tension des données et des conditions du problème. » (Fabre, 2009, p.131)

Ainsi, pour définir les moments de travail communs aux physiciens et mathématiciens, nous avons pris en compte les travaux précédemment cités, ainsi que les derniers projets européens (PRIMAS, 2011 ; FIBONACCI, 2013) sur la question de l'IBE et de l'IBSME. Nous avons retenu ceux qui sont en rapport direct avec les éléments mis en avant dans la revue de littérature synthétisée dans cet article et l'orientation des questions posées dans les entretiens. Nous avons également pris en compte la spécificité du modèle théorique cKç pour lequel nous avons adopté une position pragmatique quant à la description des problèmes du quadruplet. Nous avons donc retenu six moments de la démarche de recherche, communs aux mathématiques et à la physique :

- définir un problème,
- interpréter / analyser un problème,
- explorer / expérimenter,
- formaliser,
- théoriser,
- publier / diffuser.

Nous reviendrons plus en détail sur ces moments lors de la présentation des résultats ci-après. Notons que ces moments sont compatibles avec le canevas de 2005 et les programmes actuels en mathématiques et en sciences, dans le primaire et le secondaire.

■ **Codage des entretiens avec le modèle cKç**

L'ensemble des entretiens a été transcrit puis codé en mobilisant le modèle cKç. Néanmoins les systèmes de représentation sont afférents aux concepts mobilisés et spécifiques à chaque discipline, donc nous ne les détaillerons pas ici. Par ailleurs, nous ne préciserons pas les problèmes car cela nécessiterait une étude plus longue et spécifique, *in situ*. Pour la présentation de résultats dans cet article, nous allons faire un focus sur les invariants opératoires de la démarche des chercheurs. Nous restons donc à un niveau de descriptions de ces μ -conceptions *via* les invariants opératoires : les opérateurs et les structures de contrôle. Pour chaque entretien, nous avons ensuite regroupé les opérateurs dans des classes d'opérateurs et les structures de contrôle dans des classes de structures de contrôle.

Pour structurer la comparaison entre mathématiciens et physiciens, nous avons enfin regroupé ces résultats suivant les six moments évoqués précédemment. L'appartenance d'une classe d'opérateurs ou de structures de contrôle à un moment a été définie au regard des exemples donnés dans les entretiens par les chercheurs et le contexte de leur travail de recherche. Ainsi, une même classe d'opérateurs ou de structures de contrôle peut appartenir à un ou plusieurs moments de l'activité de recherche. Il s'agit en effet d'identifier, par exemple, si les convergences se situent dans un même moment de l'activité scientifique ou non. Dans la suite du texte, nous utiliserons les termes « opérateurs » et « structures de contrôle » pour référer aux « classes d'opérateurs » et « classes de structures de contrôle » par souci d'économie.

Voici un exemple de codage réalisé à partir de l'entretien d'un physicien se disant théoricien⁵ ; ce qui figure entre crochets correspond à notre codage suivant le modèle de cKφ :

(...) pour expliquer **comment les protéines se répartissent dans la cellule** [*P est déjà défini*] (...) Nous, « **on propose un modèle** » [R1] mais c'est synonyme pour nous d'hypothèse. Donc on propose ce modèle-là. Qu'est-ce qu'on fait ? **On fait des calculs** [R2], **on fait un certain nombre de prédictions** [R3] et ensuite **on retourne vers les biologistes** [R4] en disant : « voilà il y a ce modèle standard (...) et nous on propose ce modèle différent, **est-ce que vous avez une expérience qui permette de discriminer, de dire c'est plutôt ce modèle ou plutôt celui-là ?** [R et Σ] » (...) Donc on va proposer ça, du coup ça va suggérer éventuellement à nous ou aux biologistes de **faire des nouvelles manips pour tester plutôt tel aspect** [R et Σ].

Dans cet extrait, P correspond au problème. Il y a cinq opérateurs et deux structures de contrôle. Les trois premiers opérateurs seront regroupés dans une classe d'opérateurs relatifs à « choisir un modèle ». Il apparaît également une classe de structures de contrôle en lien avec « refaire des tests ». Notons que cette structure de contrôle pourrait aussi jouer le rôle d'opérateur, en fonction de la suite donnée à ces tests. La perméabilité opérateur-structure de contrôle sera discutée plus loin dans les analyses.

4. Que disent les chercheurs de leurs démarches de recherche ?

■ *Un focus sur trois moments de l'activité de recherche*

Pour la présentation des résultats de notre étude dans cet article, nous retenons trois des six moments de l'activité de recherche présentés précédemment. Il s'agit de « définir un problème », « interpréter / analyser un problème » et « explorer / expérimenter ». Pourquoi ce choix ? Étant donnée la place prédominante accordée à la problématisation dans les travaux des didacticiens, le moment « définir un problème » apparaît comme fondamental et incontournable aux niveaux épistémologique et didactique. Par ailleurs, le moment « interpréter / analyser un problème » n'est pas ou peu présent dans les travaux de didacticiens, mais s'inscrit dans la continuité de la définition du problème. Enfin, pour appréhender mathématiques et sciences à un même niveau où la comparaison en termes de dimension expérimentale n'est pas si transparente, nous retenons le moment « explorer / expérimenter ». Nous pensons que l'étude de ce moment va nous permettre de souligner des points communs ou divergents non cités habituellement dans les travaux en didactique. Nous présenterons nos résultats par moment sous forme de tableaux et les discuterons.

■ « Définir un problème » : des opérateurs et structures de contrôle à définir

Les problèmes traités par les chercheurs ont des origines communes : des prolongements de recherches personnelles, des lectures, des discussions (colloques, séminaires, couloir...), et des commandes externes à la discipline.

Nous avons indiqué dans le tableau 1 ci-après le nombre d'occurrences pour chaque opérateur ou structure de contrôle de la façon suivante [x / y] où x désigne le nombre de chercheurs mentionnant l'opérateur ou la structure de contrôle et y représente le nombre de chercheurs

⁵ Nous utiliserons les expressions « chercheur théoricien » et « chercheur expérimentateur » (le chercheur étant physicien ou mathématicien), simplement car les chercheurs que nous avons interviewés se sont parfois définis ainsi. À un niveau épistémologique, il est évident que cette dichotomie ne reflète pas la réalité du travail du chercheur, ne serait-ce qu'en considérant la diversité des pratiques expérimentales, et nous en sommes conscientes. Nous renvoyons pour cela au travail de Ian Hacking (1984 notamment, mais également ses cours au Collège de France) qui montre l'évolution de la place et du rôle des activités expérimentales dans la construction de la science depuis Popper. Hacking pointe également l'imbrication complexe entre expériences et théories, notamment lors de l'émergence de nouveaux phénomènes, grâce à la dialectique entre théories et expériences justement.

retenus pour la présentation de ces résultats, pour chaque discipline. Nous ferons de même pour les tableaux suivants.

Un seul opérateur apparaît en commun (tableau 1) : les échanges avec les collègues. Nous remarquons également que la dimension « travail bibliographique », transversale, est présente dans les deux disciplines, à la fois en tant qu'opérateur et en tant que structure de contrôle, ce qu'illustre cet extrait d'entretien : « *Je vais de proche en proche en faisant finalement en fait de la biblio en disant : tiens, y aurait dans ce domaine-là quelque chose d'autre qu'on pourrait faire, donc un autre champ d'application. En fonction de ça se posent de nouveaux problèmes* » (physicien théoricien 1).

Tableau 1 – Opérateur et structures de contrôle du moment « définir un problème »

Chercheurs en physique	Chercheurs en mathématiques
Opérateurs (R)	Opérateurs (R)
1) Travail bibliographique [7/7]	1) Formuler des questions [5/5] dont Identifier des questions encore ouvertes (parfois issues d'un travail bibliographique) [2/5]
2) Valider (ou non) des travaux antérieurs (en physique ou domaines connexes) et/ou les prolonger [1/7]	2) Énoncer des conjectures [5/5]
	3) Établir des liens entre différents champs ou disciplines [3/5]
Opérateur commun (R)	
Échanger avec les collègues [7/7 & 5/5]	
Structures de contrôle communes (Σ)	
- Métaconnaissances [7/7 & 5/5]	
- Travail bibliographique [2/7 & 3/5]	

Les deux opérateurs « échanges avec les collègues » et « travail bibliographique » se retrouvent dans l'extrait ci-dessous. Celui-ci s'inscrit dans **tous** les moments du travail de recherche, et illustre très bien ces opérateurs dans les autres moments que nous présentons plus loin :

« *Quand je suis bloqué dans ma recherche, il y a deux solutions. On est sur le campus donc on a quand même beaucoup de chercheurs avec qui on est en contact et qui ont des compétences très variées et donc suivant sur quel point on est bloqués, on peut demander conseil, ça c'est la première chose. Souvent, lorsqu'on parle, qu'on communique avec d'autres chercheurs qui ont d'autres points de vue, d'autres compétences, ça permet de débloquer, au moins partiellement, le problème. Et la deuxième démarche, qui est beaucoup plus classique, qui est un peu plus longue, mais qui marche très bien aussi, c'est faire de la bibliographie toujours et encore c'est-à-dire chercher des articles sur des recherches similaires dans le même matériau ou dans d'autres matériaux similaires et analyser tous ces articles et essayer de comprendre quel paramètre a pu être omis ou a pu être bloquant.* » (physicien expérimentateur et théoricien)

Les structures de contrôle communes aux deux disciplines que nous avons identifiées sont le travail bibliographique et le « niveau méta » : le préfixe « méta » est ici utilisé dans le même sens qu'Aline Robert et Jacqueline Robinet (1996). Il s'agit de ce qui a trait à une réflexion **sur** l'activité scientifique, et qui peut référer à des compétences méthodologiques, des connaissances épistémologiques, voire métacognitives. Cette réflexion « méta » sur l'activité comprend également toute analyse réflexive sur la construction de concepts, de preuves, d'expérimentations, sur ce que l'on manipule, comment on réorganise ses connaissances, etc. Cela dépend ainsi de l'individu et de sa connaissance plus ou moins diffuse, plus ou moins

explicitée comme telle, de ses propres processus de production de savoirs et de méthodes scientifiques, et donc de ses propres processus de contrôle. C'est ce que l'on retrouve dans cette phrase du physicien théoricien 1 : « *Savoir utiliser en fait ce qu'on sait ou ce qu'on devrait savoir* », ou de ce mathématicien théoricien 1 : « *Par exemple, le truc qui peut arriver, c'est que tu as un problème et tu vois une stratégie pour le démontrer (...) tu as encapsulé des propriétés, des sous-propriétés (...) tu découpes en morceaux, tu transformes ton problème (...) c'est la méta-preuve.* »

Soulignons que ces deux structures de contrôle vont apparaître de nouveau dans d'autres moments.

■ « **Interpréter/analyser un problème** » : un moment charnière et fondamental

Tableau 2 – Opérateur et structures de contrôle du moment « interpréter / analyser un problème »

<i>Chercheurs en physique</i>	<i>Chercheurs en mathématiques</i>
<i>Opérateurs (R)</i>	<i>Opérateurs (R)</i>
1) Identifier des questions encore ouvertes [2/7]	1) Rédiger des écrits intermédiaires (brouillons par exemple) [3/5]
2) Découper un problème en sous-problèmes [2/7]	2) Utiliser des exemples [2/5]
3) Analyser les paramètres du problème [1/7]	3) Instancier le problème dans différents cadres [2/5]
4) Choisir un modèle [6/7]	4) Formuler des hypothèses [3/5]
5) Changer de cadre [2/7]	5) Identifier des relations entre des objets
6) Apprendre à communiquer avec les autres domaines concernés (spécificités du vocabulaire, des problématiques, etc.) [2/7]	6) Créer une manipulation en vue d'une expérimentation [2/5]
	7) Vulgariser s'il y a une collaboration en interdisciplinarité [1/5]
<i>Structures de contrôle communes (Σ) (pour l'ensemble des chercheurs interviewés)</i>	
- Métaconnaissances [13/13]	
- Travail bibliographique [13/13]	

Ce moment « interpréter / analyser un problème » s'inscrit dans le prolongement du moment précédent, dans une même temporalité. Nous y retrouvons les mêmes structures de contrôle que précédemment dans les deux disciplines. Certaines interprétations des opérateurs tels que « choisir un modèle », « analyser les paramètres du problème » et « changer de cadre » en physique se rapprochent de « instancier le problème dans différents cadres » en mathématiques, comme le montrent les extraits d'entretiens suivants :

- Physicien théoricien 2 : « *au fur et à mesure que je rencontre des problèmes, je me trouve obligé finalement de les résoudre en allant dans un autre champ.* »
- Mathématicien théoricien 2 : « *il y a peut-être d'autres cadres voisins où les objets se ressemblent. Alors tu dis : je pourrais peut-être essayer de faire des choses là-bas, ou la question que tu as résolue t'amène à t'en poser d'autres. Mais du coup, ça c'est ... il y a une logique derrière.* »

Ces extraits ouvrent très nettement la discussion sur les changements de modèles (en physique) ou de cadres (en mathématiques) qui transforment le problème et en permettent une nouvelle formulation ; ils induisent de nouvelles questions de recherche. Les mêmes phénomènes se produisent lors de l'exploration de champs et problèmes connexes, sans lien forcément avec le

problème initial, mais qui pourtant est féconde pour la recherche de ce problème initial. Cela nous amène au moment suivant, où les opérateurs et contrôles peuvent effectivement être un détour de la recherche dans des problèmes, cadres, modèles autres que ceux travaillés dans le problème initial ou en découler.

■ « **Explorer/expérimenter** » : de nouvelles structures de contrôle

Tableau 3 – Opérateur et structures de contrôle du moment « explorer / expérimenter »

Chercheurs en physique	Chercheurs en mathématiques
<p><i>Opérateurs (R)</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Définir la faisabilité de l'expérience (manipulation) [1/7] 2) Inventer une démarche ou de nouvelles techniques [3/7] 3) Définir la nature des résultats attendus [2/7] 4) Conduire des tests préliminaires [3/7] 5) Conduire des premières analyses de premières expérimentations [3/7] 6) Faire des tests où les propriétés locales ne sont pas forcément vérifiées [1/7] 	<p><i>Opérateurs (R)</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Créer la manipulation [2/5] 2) Expérimenter dans un environnement numérique (exploration du problème et émission de conjectures) [3/5] 3) Identifier des phénomènes [5/5]
<p><i>Structures de contrôle (Σ)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Refaire des tests et manipulation [3/7] - Contrôler la consistance et la faisabilité de l'expérimentation [1/7] - Vérifier la conformité aux modèles prédictifs et modèles théoriques [2/7] - Tester des hypothèses [1/7] 	<p><i>Structures de contrôle (Σ)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Résistance aux tests (vérifications dans des environnements numériques) [2/5] - Recherche de domaines de validité des résultats [3/5] - Preuves [5/5]
<p><i>Structure de contrôle commune (Σ)</i></p> <p>La confrontation à des résultats connus (dans des domaines connexes et/ou via un travail bibliographique) pour les physiciens [2/7] et la confrontation à des problèmes dont on connaît certains résultats pour les mathématiciens [2/5].</p>	

Une comparaison entre les opérateurs mobilisés par les chercheurs de chaque discipline montre une convergence entre deux opérateurs, au vu des entretiens complets :

- « inventer une démarche » en physique peut se rapprocher de « créer la manip » en mathématiques. Ce physicien expérimentateur et théoricien explique que : « *Inventer une démarche en lien avec nos compétences, en fait il faut qu'on invente à chaque fois une démarche qui soit appropriée justement à nos objectifs... (...) Cette démarche change en fonction de nos partenaires (...).* » Et ce mathématicien expérimentateur précise que : « *Il y a donc une démarche expérimentale de la même façon qu'un physicien expérimentateur sauf que la manip c'est nous qui la créons puisqu'on écrit un programme de calcul et ensuite on essaie d'en produire des propriétés. Je regarde, je regarde, j'essaie d'analyser des résultats et des sorties et j'en déduis ce qui m'intéresse.* »
- « conduire les premières analyses des premières expérimentations » correspond en fait à « expérimenter dans un environnement numérique ». Bien que l'outil utilisé n'est pas le même entre les chercheurs des deux disciplines, il s'agit du même opérateur.

Dans le tableau 3, nous remarquons qu'au niveau épistémologique, les opérateurs mobilisés en physique pourraient l'être également en mathématiques et réciproquement. Cette proximité des opérateurs n'est visible que partiellement dans les entretiens (voir l'extrait ci-dessus du mathématicien expérimentateur), nous ne pouvons donc que formuler une hypothèse de recherche.

Dans ce moment « explorer / expérimenter », de nouvelles structures de contrôle apparaissent, dont certaines sont proches dans les deux disciplines. Nous pourrions en effet rapprocher « refaire des tests et manipulations » en physique de la « résistance aux tests (vérifications dans des environnements numériques) » en mathématiques ; et « confronter à des résultats connus (domaines connexes) et bibliographique » en physique de « confrontation à des problèmes dont on connaît des résultats » en mathématiques. De plus, « vérifier la conformité aux modèles prédictifs et modèles théoriques » est une spécificité en physique.

Par ailleurs, la structure de contrôle « recherche de domaine de validité de résultats » en mathématiques pourrait également être considérée comme un opérateur : l'opérateur permet de transformer le problème et la structure de contrôle est en quelque sorte une action sur l'action. « La perméabilité opérateur-contrôle reflète (...) une multiplicité des points de vue possibles de l'observateur » (Mithalal, 2010, p.106), et pour le moment étudié ici, nous sommes bien davantage du côté du contrôle. Cela étant, la perméabilité opérateur-contrôle est un avantage du modèle cKç car elle permet de rendre compte de différents points de vue sur un objet ou un processus d'un point de vue théorique. Pour cette structure de contrôle, « recherche de domaine de validité de résultats », nous trouvons un analogue en physique dans un moment plus théorique de la démarche de recherche (dans le moment que nous avons appelé « théoriser »).

Les structures de contrôle « tester des hypothèses » et « faire des preuves » ont des interprétations spécifiques suivant la discipline sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici. De la même façon, différents niveaux d'interprétations sont possibles pour les termes « manipulation », « expérimentation », « hypothèses », « preuve », « démonstration » ; nous soulignons l'importance de les définir pour une étude plus poussée sur la démarche expérimentale en physique et en mathématiques qui n'est pas notre propos dans cet article.

Conclusion

Éléments de conclusion au niveau épistémologique et théorique

Le modèle d'analyse (cKç) retenu s'est révélé opérationnel et a permis de hiérarchiser les invariants opératoires (opérateurs et structures de contrôle). Des points de convergence mathématiques/physique ont pu être soulignés à l'échelle mésoscopique (origine des problèmes, contrôles « méta », revue bibliographique...), et quelques points de convergence propres aux démarches de recherche de ces deux disciplines ont pu être pointés à un niveau plus micro (tels que les changements de cadres). Nous avons également identifié des opérateurs communs aux mathématiques et à la physique, mais utilisés à différents moments de la démarche de recherche suivant la discipline. Soulignons que cette étude est locale et basée sur des pratiques déclarées à un moment donné qui est celui de l'entretien. L'absence d'un opérateur par exemple ne peut pas être interprétée comme une absence permanente de la pratique du chercheur. Cet aspect « ponctuel » représente un obstacle pour le traitement quantitatif des données, mais des entretiens en nombre suffisant permettent cependant de rendre compte d'un processus de recherche en physique et en mathématiques, même s'il demeure forcément partiel. Ce type d'étude théorique prolonge et diversifie les recherches en didactique sur les pratiques des chercheurs en mathématiques (voir par exemple, Ouvrier-Bufferet, 2013 ; Burton, 2004 ou encore Weber, 2008, 2011) et ouvre de nouvelles opportunités en sciences.

Par ailleurs, lors de l'analyse détaillée réalisée avant la présentation synthétique par les tableaux retenus dans cet article, nous pouvons remarquer des différences entre physiciens et mathématiciens quant à la place et au rôle de l'expérience, la nature de la validation (interne ou externe, théorique et expérimentale ou seulement théorique), la définition des problèmes, l'analyse et l'exploration des problèmes, et la description du moment « théoriser ». Les spécificités des domaines disciplinaires des interviewés peuvent être un élément de contexte de ces différences, mais pas seulement. Cela étant, une exploration plus large serait nécessaire pour conforter ces différences et en tirer des enseignements didactiques.

Impacts pour la recherche en didactique

Deux points épistémologiques fondamentaux de la démarche de recherche, actuellement peu pris en compte dans l'enseignement basé sur l'investigation, sont ressortis de l'analyse des entretiens avec les chercheurs :

- l'étude de la portée des résultats et la « reproductibilité » de la démarche ;
- la nécessité de rendre explicite une « théorie locale » (en mathématiques) et un « domaine de validité d'un modèle » (en physique).

Il est également possible de considérer de manière plus explicite les métaconnaissances que l'on retrouve dans la description des structures de contrôle et qui peuvent se révéler être des aides futures à l'action pour l'élève. En effet, ces métaconnaissances peuvent être de différents types (Robert & Robinet, 1996) et si on les considère *via* le prisme des structures de contrôle et des opérateurs, leur opérationnalité peut être variée : à titre d'exemple, les contrôles peuvent désigner le choix de l'opérateur, ou assurer la validité de l'opérateur ou encore assurer la validité d'un résultat (voir l'étude de Miyakawa, 2005, p.74). Comment transposer ce type de connaissances ? Lesquelles seraient souhaitables ? Ces questions intéressent clairement de manière conjointe la didactique des mathématiques et la didactique de la physique. Ici, le modèle cKç est en fait une autre façon de considérer les questions de transposition à la classe.

Par ailleurs, promouvoir davantage le travail collaboratif apparaît également comme fondamental dans une perspective didactique globale. En effet, le travail collaboratif dans le cadre des DI intervient, certes, au niveau des élèves, mais aussi au niveau des enseignants. De plus, Artigue et Blomhøj (2013, p.808) souligne qu'en mathématiques, « Conceptualization of IBME must take into account this essential dimension of IBME, considering the inquiry process as a collaborative process, and a process not necessarily limited to the space of the classroom or even the school. » Enfin, le travail collaboratif dans la pratique d'une démarche de recherche est fondamental et nous pouvons interroger, par ce biais, les pratiques collaboratives des enseignants, mais aussi celles des chercheurs que ce soit au sein d'un même champ de recherche, au sein d'une même discipline, ou à un niveau de pratiques interdisciplinaires. Notons que l'interdisciplinarité est réelle et se manifeste dans le travail des chercheurs aussi au sein d'une même discipline. En effet, plusieurs champs composent chacune des disciplines « mathématiques » et « physique », et l'interdisciplinarité commence en « intra » avant de se développer au-delà de la discipline elle-même. Des outils théoriques tels que les jeux de cadres (Douady, 1986) permettent d'appréhender une partie de cette intradisciplinarité, mais cela reste un point à investiguer également pour les didacticiens et pour la pratique des démarches de recherche en classe.

Enfin, la dimension relative à l'écriture et à la communication des résultats d'une recherche est également apparue importante dans les entretiens, à la fois en termes d'opérateurs, mais aussi de structures de contrôle. Différents types d'écrits existent dans la recherche en didactique (Misfeldt, 2006 ; Weber, 2011) : le travail des didacticiens doit se poursuivre dans cette direction, en soulignant l'importance de la diffusion dans différentes communautés des résultats d'une recherche conduite par des élèves (à l'image de *Maths.en.Jeans* et *Maths à Modeler*) (Ouvrier-Buffet, 2009).

Perspectives

Ce travail, encore en cours au niveau de la modélisation des conceptions de chercheurs contemporains en mathématiques et en physique, permet déjà de lancer de nouvelles perspectives de travail.

Revisiter les « grands classiques »

Des différences existent clairement entre les fondements de la démarche contemporaine et les grands « classiques » tels que Bachelard, Popper, Lakatos, etc. Une recherche à la fois épistémologique et sociologique (dans le sens de la sociologie des sciences) permettrait de montrer l'évolution des conceptions sur les démarches de la recherche scientifique. Une telle étude, conséquente à conduire, apporterait sans nul doute de nouvelles idées pour l'enseignement des mathématiques et des sciences pour les élèves de demain. Cela étant, la science qui se pratique évolue à grande vitesse, d'où la nécessité d'avoir un cadrage théorique fixe et permettant une telle étude évolutive et comparative (entre mathématiques et physique voire sciences). Nous faisons l'hypothèse que le modèle cKç pourrait être là un élément central. Au niveau théorique, demeure alors la question de la définition des problèmes dans le quadruplet ainsi que du niveau de granularité de description des invariants opératoires. De plus, l'enrichissement du modèle peut se poursuivre au regard d'autres cadres théoriques, notamment au niveau de l'étude des systèmes de représentation et structures de contrôle (Balacheff, 2013).

Transposer la démarche contemporaine de recherche en classe ?

Que signifie travailler « comme les scientifiques » ? Nous posons la question ainsi car nous retrouvons en effet cette idée-force dans différentes recherches, avec une définition de l'IBE, reprise pour l'IBSME : « IBE is a way of teaching and learning mathematics and science in which students are invited to work in the way mathematicians and scientists work » (PRIMAS, 2011, p.10). Une hypothèse forte affirmée dans les projets européens est que les compétences développées dans l'IBE (semblables à celles des scientifiques) permettent une « meilleure » appropriation des savoirs scientifiques. Cela nous ramène à la question de la transposition de la démarche contemporaine de recherche en classe. Cette question, particulièrement complexe, amène les didacticiens à être plus attentifs aux transpositions éducatives des démarches expérimentales et théoriques spécifiques de la recherche contemporaine à la classe. Le modèle théorique retenu dans cet article permet d'appréhender d'une certaine façon la question de la transposition sous un angle nouveau. Il apporte des éléments tangibles quant aux invariants opératoires, engage une discussion sur la comparaison entre physique et mathématiques, et donne des pistes pour baliser l'évolution de conceptions d'apprenants. En effet, les élèves et étudiants commencent la construction d'une posture scientifique *via* des situations proches de démarches d'enquête et d'investigation. Ils construisent ainsi un rapport au savoir scientifique, ainsi qu'une certaine rationalité scientifique (pour la question de la définition des rationalités, voir par exemple Lecorre, 2016). Nous faisons l'hypothèse que l'utilisation du modèle cKç pourrait permettre le balisage de l'évolution de cette rationalité scientifique au cours du temps, du primaire à l'université. Au niveau de l'enseignement supérieur, un tel balisage peut et doit être mis en perspective avec la posture épistémologique de l'enseignant-chercheur qui cherche et de l'enseignant-chercheur qui enseigne, et là aussi, il s'agit d'un vaste programme de recherche devant prendre en compte les pratiques sociales de référence des chercheurs dans un sens global.

Dans une perspective d'enrichissement de l'IBE en classe plus « immédiate », insistons sur différents aspects de la transposition de la démarche contemporaine de recherche à différents niveaux d'enseignement. Il est vrai que les élèves ne sont pas comme les scientifiques, ce sur quoi Grandy & Duschl (2008) insistent : leur organisation sociale et leurs motivations diffèrent ; les scientifiques lisent, écrivent, débattent sur les théories et les modèles qui sont des entités et processus non observables par des élèves ; les scientifiques évaluent les théories et les modèles « contre » la pratique, etc. Les définitions usuelles de l'IBE mettent clairement en évidence certains aspects épistémologiques incontournables de cette activité : la génération de questions

et la définition d'un problème, la mise en relation entre des faits et des connaissances scientifiques, la communication et la justification des résultats. De plus, l'existence de savoirs transversaux, communs aux mathématiques et aux sciences, est réelle et ceux-ci sont recensés dans PRIMAS (2011, p.10) par exemple : « simplifying and structuring complex problems, observing systematically, measuring, classifying, creating definitions, quantifying, inferring, predicting, hypothesizing, controlling variables, experimenting, visualizing, discovering relationships and connections, and communicating. » Il nous est difficile, au regard des travaux existants en didactique, d'affirmer que de tels savoirs transversaux fassent l'objet d'explicitations et d'institutionnalisations en classe. Par ailleurs, chacun d'entre eux nécessite une étude spécifique suivant la discipline dans le cadre d'un double questionnement plus large en partie abordé dans cet article (Ouvrier-Buffet, 2015) : quels sont les différents moments de l'activité de recherche ? Lesquels transposer (avec quel degré de transposition quant aux types de problèmes issus de la recherche, aux types de démarches, aux types de contenus théoriques ou axiomatiques, etc.) et dans quels buts ? Un vaste programme de recherche se dessine encore ici.

Notre recherche permet déjà d'envisager des points épistémologiques de la démarche des chercheurs peu pris en compte dans l'IBE, ce qui souligne, à titre illustratif, la place que la science qui se pratique peut prendre aujourd'hui dans la science qui s'enseigne, du primaire à l'université.

Références

- ARTIGUE Michèle (1993), « Connaissance et métaconnaissance, une perspective didactique » dans Monique Baron & Aline Robert (éds.), *Métaconnaissances en IA, en EIAO et en didactique des mathématiques*, Paris, Institut Blaise Pascal, p.29-42.
- ARTIGUE Michèle (1991), « Épistémologie et didactique », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.10(2/3), p.241-285.
- ARTIGUE Michèle & BLOMHØJ Morten (2013), « Conceptualizing inquiry-based education in mathematics », *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik (The International Journal on Mathematics Education)*, n°45, p.797-810.
- ARTIGUE Michèle & MAAß Katja (2013), « Implementation of inquiry-based learning in day-to-day teaching: a synthesis », *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik (The International Journal on Mathematics Education)*, n°45, p.779-795.
- BACHELARD Gaston (1938), *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin.
- BALACHEFF Nicolas (1995), « Conception, connaissance et concept » dans Denise Grenier (éd.), *Séminaire Didactique et Technologies cognitives en mathématiques*, Grenoble, IMAG, p.219-244.
- BALACHEFF Nicolas (2003), « cKc Modèle de connaissances pour le calcul de situations didactiques », *XI^e École d'Été de Didactique des Mathématiques*, Grenoble, La Pensée Sauvage.
- BALACHEFF Nicolas & MARGOLINAS Claire (2005), « cKc Modèle de connaissances pour le calcul de situations didactiques », dans Alain Mercier & Claire Margolinas (éds.), *Balises pour la didactique des mathématiques*, Grenoble, La Pensée Sauvage, p.1-32.
- BALACHEFF Nicolas (2013), « cKc, a model to reason on learners' conceptions », dans Mara V. Martinez et Alison Castro Superfine (éds.), *Proceedings of the 35th annual meeting of the PME-NA*, Chicago, University of Illinois at Chicago, p.2-15.
- BARRERA Martinez, LUZ Helena, DE HOSSON Cécile & DÉCAMP Nicolas (2015), « Construire un problème : un premier pas vers l'investigation en sciences. Analyse d'une formation d'enseignants de primaire en contexte français et colombien », *Recherches en Éducation*, n°21, p.51-66.
- BOILEVIN Jean-Marie (2013a), « La place des démarches d'investigation dans l'enseignement des sciences », dans Michel Grangeat (éd.), *Les enseignants de sciences face aux démarches d'investigation. Des formations et des pratiques de classe*, Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, p.27-53.

BOILEVIN Jean-Marie (2013b), *Rénovation de l'enseignement des sciences physiques et formation des enseignants, Regards didactiques*, Bruxelles, De Boeck.

BOILEVIN Jean-Marie, DELSERIEYS Alice, BRANDT-POMARES Pascale, & COUPAUD Magali (2016), « Démarches d'investigation. Histoire et enjeux », dans Corinne Marlot & Ludovic Morge (éds.), *L'investigation scientifique et technologique. Comprendre les difficultés de mise en œuvre pour mieux les réduire*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, p.23-44.

BOSCH Marianna & WINSLOW Carl (2015), « Linking problem solving and learning contents: the challenge of self-sustained study and research processes », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.35/3, p.357-401.

BROUSSEAU Guy (1986), « Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.7/2, p.33-115.

BURTON Leone (2004), *Mathematicians as enquirers: Learning about learning mathematics*, Berlin, Springer.

CALMETTES Bernard (éd.) (2012), *Démarches d'investigation : références, représentations, pratiques et formation*, Paris, L'Harmattan.

CALMETTES Bernard & MATHERON Yves (éds.) (2015), *Recherches en éducation*, n°21 (Les démarches d'investigation et leurs déclinaisons en mathématiques, physique, sciences de la vie et de la Terre).

CARIOU Jean-Yves (2011), « Histoire des démarches en sciences et épistémologie scolaire », *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, n°3, p.83-106.

CARIOU Jean-Yves (2015), « Quels critères pour quelles démarches d'investigation ? Articuler esprit créatif et esprit de contrôle », *Recherches en Éducation*, n°21, p.12-33.

CROSS David & GRANGEAT Michel (2014), « Démarches d'investigation : analyse des relations entre contrat et milieu didactiques », *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, n°10, p.169-192.

DEWEY John (1993), *Logique : la théorie de l'enquête*, Paris, Presses Universitaires de France.

DOUADY Régine (1986), « Jeux de cadres et dialectique outil-objet », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.7(2), p.5-31.

EL HAGE Suzane & PLÉ Élisabeth (2016), « Démarches d'investigation en sciences : des références épistémologiques questionnées au regard de la science qui se pratique », Actes des 9^{es} rencontres scientifiques de l'Association de Recherche en Didactiques, Sciences et Technologies (ARDIST), Lens, En ligne <https://ardist2016lens.sciencesconf.org/82701/document>

EURYDICE (2006), *L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe. États des lieux des politiques et de la recherche*, Direction générale de l'Éducation et de la Culture, Commission Européenne.

FABRE Michel (2009), *Philosophie et pédagogie du problème*, Paris, Vrin.

FIBONNACCI Project (2013), *Designing, implementing, testing and formalising a process of dissemination in Europe of inquiry-based teaching and learning methods in science and mathematics in primary and secondary schools*, En ligne <http://www.fibonacci-project.eu/>

GARDES Marie-Line (2013), *Étude de processus de recherche de chercheurs, élèves et étudiants, engagés dans la recherche d'un problème non résolu en théorie des nombres*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon 1.

GRANDY Richard & DUSCHL Richard E. (2008), « Reconsidering the Character and Role of Inquiry in School Science: Framing the Debates », dans Richard Grandy & Richard Duschl (éds.), *Teaching scientific inquiry. Recommendations for research and implementations*, Sense Publishers, p.1-37.

GRANGEAT Michel (éd.) (2013), *Les enseignants de sciences face aux démarches d'investigation. Des Formations et des pratiques de classe*, Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble

GRENIER Denise & PAYAN Charles (2003), « Situations de recherche en “classe”, essai de caractérisation et proposition de modélisation », dans Viviane Durand-Guerrier & Claude Tisseron (éds.), *Actes du Séminaire National de didactique des mathématiques. Année 2002*, Paris, ARDM et IREM de Paris 7, p.189-204.

HACKING Ian (1984), *Concevoir et expérimenter*, Paris, Bourgeois (trad. 1989).

HAZELKORN Ellen, RYAN Charly, BEERNAERT Yves, CONSTANTINOU Constantinos P., DECA Ligia, GRANGEAT Michel, KARIKORPI Mervi, LAZOUUDIS Angelos, PINTO Casulleras Roser & WELZEL-BREUER Manuela (2015), *Science Education for Responsible Citizenship*, Report to the European Commission of the expert group on science education, En ligne http://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_science_education/KI-NA-26-893-EN-N.pdf

HERSANT Magali (2012), « Recherche et résolution de problèmes dans l'enseignement des mathématiques : une étude didactique pour identifier les savoirs et les apprentissages possibles », dans Anissa Belhadjin, Marie-France Bishop, Marie-Laure Elalouf & Aline Robert (éd.), *Les didactiques en questions : état des lieux et perspectives pour la recherche et la formation*, Bruxelles, De Boeck, p.192-202.

HERSANT Magali & ORANGE-RAVACHOL Denise (2015), « Démarche d'investigation et problématisation en mathématiques et en SVT : des problèmes de démarcation aux raisons d'une union », *Recherches en Éducation*, n°21, p.95-108.

JAMEAU Alain & BOILEVIN Jean-Marie (2015), « Les déterminants de la construction et de la mise en œuvre de démarches d'investigation chez deux enseignants de physique-chimie au collège », *Recherches en Éducation*, n°21, p.109-122.

KUHN Thomas S. (1962), *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion (trad. 1970).

LAUDAN Larry (1977), *La dynamique de la science*, Bruxelles, Pierre Madraga (trad. 1987).

LECORRE Thomas (2016), *Des conditions de conception d'une ingénierie relative à la définition de la notion de limite*, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.

MAAß Katja, ARTIGUE Michèle, DOORMAN L. Michiele, KRAINER Konrad & RUTHVEN Kenneth (éds.) (2013), « Implementation of Inquiry-Based Learning in Day-to-Day Teaching », *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik (The International Journal on Mathematics Education)*, n°45(6), p. 779-795.

MATHÉ Stéphanie (2010), *La « démarche d'investigation » dans les collèges français. Élaboration d'un dispositif de formation et étude de l'appropriation de cette méthode d'enseignement par les enseignants*, Thèse de doctorat, Université Paris Diderot-Paris 7.

MISFELDT Morten (2006), *Mathematical Writing*, Copenhagen, DPU Press.

MITHALAL Joris (2010), *Déconstruction instrumentale et déconstruction dimensionnelle dans le contexte de la géométrie dynamique tridimensionnelle*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1.

MIYAKAWA Takeshi (2005), *Une étude du rapport entre connaissance et preuve : le cas de la notion de symétrie orthogonale*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1.

MODESTE Simon (2012), *Enseigner l'algorithme pour quoi ? Quelles nouvelles questions pour les mathématiques ? Quels apports pour l'apprentissage de la preuve*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1.

MORGE Ludovic & BOILEVIN Jean-Marie (2007), *Séquence d'investigation en physique-chimie au collège et au lycée*, Clermont-Ferrand, CRDP d'Auvergne.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2000), *Inquiry and the National Science Education Standards. A guide for teaching and learning*, Washington, National Academy Press.

OUVRIER-BUFFET Cécile (2009), « Maths à Modeler: Research-Situations for Teaching Mathematics », dans Ed Barbeau & Peter Taylor (éds.), *ICMI Study 16, Challenging Mathematics in and beyond the Classroom*, US, Springer, p.23-29.

OUVRIER-BUFFET Cécile (2013), *Modélisation de l'activité de définition en mathématiques et de sa dialectique avec la preuve. Étude épistémologique et enjeux didactiques*, Note de synthèse d'Habilitation à diriger des recherches, Université Paris Diderot (Paris 7), En ligne <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00964093>

OUVRIER-BUFFET Cécile (2015), « Modéliser l'activité de définition : vers de nouvelles perspectives en didactique », *Recherches en didactique des mathématiques*, n°35(3), p.313-356.

OUVRIER-BUFFET Cécile, DE HOSSON Cécile & BOSDEVEIX Robin (2016), « Inquiry-based education (IBE): towards an analyzing tool to characterize and analyze inquiry processes in mathematics and natural sciences », dans Bernard Hodgson, Alain Kuzniak et Jean-Baptiste Lagrange (éds.), *The Didactics of Mathematics: Approaches and Issues. À l'hommage de Michèle Artigue*, New York, Springer, p.191-217.

POINCARÉ Henri (1905), *La valeur de la science*, Paris, Flammarion.

POPPER Karl (1979), *Objective Knowledge. An Evolutionary Approach*, Oxford University Press.

ROBERT Aline & ROBINET Jacqueline (1996), « Prise en compte du "méta" en didactique des mathématiques », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, n°16(2), p.145-176.

ROCARD Michel, CSERMEY Peter, JORDE Doris, LENZEN Dieter, WALBERG-HENRIKSON Harriet & HEMMO Valerie (2007), *L'enseignement scientifique aujourd'hui : une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe*, Commission Européenne, Direction générale de la recherche, Science, économie et société.

THE PRIMAS PROJECT (2011), *Promoting inquiry based learning (IBL) in mathematics and science education across Europe - PRIMAS guide for professional development providers*, En ligne www.primas-project.eu/

TIBERGHIEU Andrée (2011), « Conception et analyse de ressources d'enseignement : le cas des démarches d'investigation », dans Michel Grangeat (éd.), *Les démarches d'investigation dans l'enseignement scientifique Pratiques de classe, travail collectif enseignant, acquisitions des élèves*, Lyon, INRP.

VERGNAUD Gérard (1991), « La théorie des champs conceptuels », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, n°10(2/3), p.133-169.

WEBER Keith (2008), « How mathematicians determine if an argument is a valid proof », *Journal for Research in Mathematics Education*, n°39(4), p.431-459.

WEBER Keith (2011), « Why and how mathematicians read proofs: an exploratory study », *Educational Studies in Mathematics*, n°76, p.329-344.

Liste des acronymes

DI : démarche d'investigation
 IBE : *Inquiry-Based Education*
 IBME : *Inquiry-Based Mathematics Education*
 IBSME : *Inquiry-Based Science and Mathematics Education*

Grille d'entretien

- 1) Pouvez-vous vous présenter (ancienneté et domaine de recherche) ?
- 2) Comment choisissez-vous les problèmes / les questions de recherche sur lesquelles vous travaillez ?
- 3) Quelle(s) démarche(s) de recherche utilisez-vous ?
- 4) Est-ce que votre façon de chercher a évolué depuis que vous êtes chercheur et si oui, comment ?
- 5) Décrivez votre démarche de recherche favorite.
- 6) Quand vous êtes bloqué(e) dans votre recherche, que faites-vous, quel type d'aide recherchez-vous ?
- 7) Qu'est-ce qu'une hypothèse pour vous ? À quel(s) moment(s) de votre recherche l'utilisez-vous ? Utilisez-vous ce terme dans votre travail ?
- 8) Qu'est-ce qu'une conjecture pour vous ? À quel(s) moment(s) de votre recherche l'utilisez-vous ? Quelle est la place et quel est le rôle de la preuve dans votre démarche de recherche ?
- 9) Quels moyens (quel outil technique, matériel, théorique, etc.) mobilisez-vous dans votre démarche de recherche ?
- 10) Et l'expérimentation dans tout ça ? Comment l'utilisez-vous ? Quelle place a-t-elle dans votre travail de recherche ?
- 11) Comment validez-vous vos productions / résultats ?
- 12) À quel(s) moment(s) de votre recherche intervient le travail collaboratif ?
- 13) Sous quelle forme ? Avec quelle(s) fonction(s) ?

- 14) Quels impacts sur la recherche individuelle ?
- 15) Quelle est la place des écrits de recherche dans votre travail de recherche ?
- 16) Quels types d'écrits et quels rôles ?
- 17) Est-ce que vous écrivez avant de publier (écrits privés ou autres) ?
- 18) Pourriez-vous expliciter vos référents épistémologiques ? (précision si nécessaire : vos « maîtres de pensée » dans votre discipline ou dans la « philosophie » de votre discipline).