

VALERIE MUNIER, JEROME PROULX

DE LA SPÉCIFICITÉ DES DISCIPLINES AUX PRATIQUES  
ENSEIGNANTES ET À LA FORMATION : QUELQUES RÉFLEXIONS  
POUR LES MATHÉMATIQUES ET LES SCIENCES

**Abstract. From content specificity to teaching practices and teacher education: thoughts about mathematics and sciences.** This article addresses questions relative to teachers of mathematics and sciences. We first establish the notion of the specificity of both disciplines as an epistemological background to underpin our ways of tackling questions about teachers' practices, knowledge and training initiatives. Addressing issues about practices (of teachers and of teacher education) in relation to each disciplines' specificity invites taking into account the nature of scientific and mathematical activity in itself. These orientations lead to consider the possibilities, in contrast to prescriptions, for addressing issues of teachers' knowledge and practices, and their implications for teacher education practices.

**Keywords.** teaching practices, knowledge, teacher education, mathematics, sciences, specificity

**Résumé.** Cet article aborde des questions relatives aux enseignants de mathématiques et de sciences. Notre entrée pose comme arrière-plan une prise en compte des spécificités des mathématiques et de la physique, pour engager des réflexions épistémologiques sur ces disciplines et leur implication relativement aux questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants. Penser les pratiques (enseignantes et de formation) relativement aux spécificités des disciplines force une prise en compte de la nature de l'activité mathématique et scientifique, voire une sensibilité et flexibilité au regard de ses possibilités. C'est à travers cette ouverture à « ce qui peut se faire », et non à « ce qui devrait se faire », que nous abordons la question des connaissances mathématiques et scientifiques des enseignants, de leurs pratiques et des implications en termes de formation.

**Mots-clés.** pratiques enseignantes, connaissances, formation, mathématiques, sciences, spécificité

---

**Introduction : contextualiser notre collaboration**

Notre démarche de collaboration a débuté en novembre 2021 dans le but de préparer notre conférence plénière, portant sur les questions de connaissance, de pratiques et de formation des enseignants en mathématiques et en sciences. Ne nous connaissant pas du tout, le défi était de réussir à identifier ce qui pouvait faire cohésion et cohérence pour une plénière à deux voix. Lors de notre première

rencontre, les trois questions informelles suivantes ont été soulevées comme points de départ pour initier la discussion :

- Q1 : À quoi se réfère-t-on lorsque l'on parle de connaissances des enseignants ?
- Q2 : De quoi un enseignant a-t-il besoin pour bien enseigner ? Qu'est-ce qu'un bon enseignant ?
- Q3 : Pourquoi, et sur quoi, former les enseignants ?

Dans le but de nous connaître davantage, nous avons démarré une sorte de dialogue à travers une série d'échanges écrits pour explorer la manière dont nous nous emparions de ces questions que nous avons, à notre manière, déjà travaillées dans nos disciplines respectives. Suite à ces échanges (sur plus de 20 pages), nous avons organisé quelques rencontres pour concrétiser notre travail de collaboration en vue du colloque.

Il nous est apparu qu'au-delà de nos différences, nous avons des visions communes et des affinités épistémologiques qui ont interpellé nos perspectives didactiques et positionnements théoriques en recherche et formation. De ces affinités a émergé une question clé, qui a guidé notre collaboration :

Qu'est-ce qui peut être proposé/compris/défendu du point de vue de la recherche par rapport aux pratiques enseignantes, aux connaissances enseignantes et à la formation des enseignants en mathématiques et en sciences<sup>1</sup> ?

C'est cette question qui a orienté notre intervention en plénière lors du colloque, et par le fait même cet article. Il est important pour nous que le lecteur garde en tête cette question clé au fil de sa lecture pour saisir le rationnel de ce qui est présenté. De plus, tout comme lors de la plénière « à deux voix », une tâche particulière est exigée du lecteur dans cet écrit à « deux mains ». Lorsque l'écrit est fait par la main de la didacticienne des sciences, les exemples, idées et théories sont davantage relatifs aux travaux en didactique des sciences – le contraire pour la main du didacticien des mathématiques – et la manière dont cela fait écho dans l'autre discipline est présentée plus brièvement. Il revient au lecteur, tout comme nous avons dû le faire entre nous durant notre collaboration, d'explorer les exemples relatifs à son propre domaine d'expertise, sur la base des références proposées. Nous ne pouvons qu'espérer que ceci participe à alimenter les réflexions relatives

---

<sup>1</sup> Dans cet article les propos concernant les sciences concernent essentiellement les sciences physiques et chimiques (SPC), même si certains propos sont également valables pour les Sciences de la Vie et de la Terre, et les exemples et références relèvent essentiellement de la didactique des SPC.

aux interactions entre les deux disciplines, tel que le souhaitaient les organisateurs du colloque.

Nos propos s'appuient sur un positionnement relatif à certaines spécificités des disciplines mathématiques et scientifiques, qui constitue une sorte de trame de fond pour notre intervention. Ce positionnement est présenté dans la Partie 1 de l'article, offrant des éléments jugés essentiels pour aborder la question clé soulevée ci-haut. Par la suite, la Partie 2 de l'article aborde en trois temps la thématique au cœur de notre collaboration, soit les enjeux en termes de pratiques, connaissances et formation des enseignants de mathématiques et de sciences. Ces deux parties constituent le corps de l'article, complété d'une conclusion qui ouvre sur des éléments relatifs aux interactions et affinités entre les didactiques des mathématiques et des sciences physiques qui ont émergé de notre collaboration.

## **1. Spécificité des disciplines**

La spécificité des disciplines représente une dimension fondamentale des travaux en didactique des mathématiques et des sciences. Une part importante des travaux de Guy Brousseau (e.g., 1998) en didactique des mathématiques concerne justement la spécificité des mathématiques, signifiant que l'enseignement des mathématiques ne peut pas se penser à vide, en faisant abstraction des mathématiques, mais doit plutôt se faire de façon dépendante et directement reliée à elles. La considération de cette spécificité nous apparaît en ce sens centrale pour toute réflexion concernant les questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants en mathématiques et en sciences. Nous considérons ici trois types, imbriqués, de spécificité des disciplines : la spécificité des savoirs, la spécificité des pratiques et la spécificité épistémologique.<sup>2</sup>

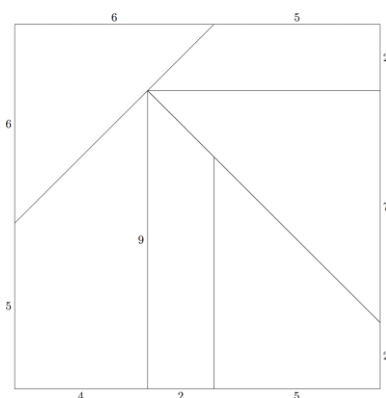
### **1.1. Spécificité des savoirs**

Cette première spécificité des disciplines est probablement la plus connue, étant reliée directement aux savoirs mathématiques et scientifiques. Ainsi, dans ses travaux, Brousseau décline particulièrement bien cette spécificité, entre autres, par la mise en place de situations qui sont directement enracinées dans des savoirs mathématiques spécifiques que ladite situation a pour but de faire fonctionner. À titre d'exemple, la situation du casse-tête (figure 1) a pour but de faire émerger la multiplication par un nombre rationnel à travers un travail faisant intervenir la

---

<sup>2</sup> La question de la spécificité n'en signifie pas une d'exclusivité, car des disciplines différentes peuvent partager les mêmes spécificités. Toute notion de spécificité des disciplines en est une qui se veut représentative de la discipline elle-même, relative et constitutive de celle-ci, sans en affirmer l'exclusivité face aux autres disciplines.

proportionnalité sous l'angle d'une relation homothétique (reproduction d'un casse-tête initial selon certaines contraintes : par exemple, une pièce d'une longueur de 4 cm doit avoir une longueur de 7 cm dans le casse-tête reproduit).



**Figure 1.** Illustration du casse-tête proposé par Brousseau (1998)

Il est possible de voir que cette idée de casse-tête pour aborder la multiplication par un nombre rationnel prend sa source, par exemple, dans la nature du nombre rationnel lui-même, qui historiquement se veut un certain aboutissement des premières théories sur les ratios et proportions des livres V à X des éléments d'Euclide : où le ratio établi entre deux grandeurs en est venu à être conçu sous l'angle d'un lien multiplicatif entre ces deux mêmes grandeurs et, à travers toutes les questions de mesure et de commensurabilité, jusqu'à en devenir un nombre à part entière plus tard dans l'histoire (voir e.g. Dahan-Dalmedico et Pfeiffer, Ch. 2, 1987). La même chose peut être dite pour d'autres situations développées par Brousseau : la course à vingt (division euclidienne, contrôle du reste, périodicité) ou la situation de l'épaisseur d'une feuille de papier (densité des rationnels, concept de mesure, commensurabilité).

Chacune de ces situations provient de, prend sa source dans, et est conçue en fonction d'un savoir mathématique précis. La nature même de ce savoir (son sens, sa rationalité, son développement historique, les obstacles à sa construction, etc.) orientent les situations développées. C'est ainsi que ces situations sont vues comme étant spécifiques aux mathématiques, car elles prennent leur source dans les savoirs mathématiques qu'elles visent directement à faire fonctionner et font émerger ces mêmes savoirs comme solutions optimales à la résolution des dites situations. De plus, et ceci est fort important, il y a en arrière-plan de cette analyse des savoirs et de leur émergence par la situation une intention explicite de faire vivre une sorte de genèse artificielle des savoirs visés (Brousseau, 1988). À travers cette inspiration,

reliée à la spécificité des savoirs, réside une intention pour le contexte d'enseignement que ces savoirs soient vécus à travers un développement ou une évolution, et non « donnés » directement aux élèves ou déjà « tout emballés ». La genèse recherchée, bien qu'artificielle sur un temps court relativement à l'avènement de ces savoirs dans l'histoire, veut immerger les élèves dans une expérience voulant leur permettre de (re-)vivre un développement de ces savoirs pour les ancrer dans des expériences situées et authentiques vécues à travers ces situations qui les feront naître<sup>3</sup>. Cette volonté de faire vivre aux élèves une genèse des savoirs visés est fortement ancrée dans les travaux de Bachelard (1938) et son concept d'obstacle épistémologique : il s'agit en effet de construire des situations dont l'objectif est le « franchissement » de ces obstacles, découlant sur les savoirs visés.

Cette même volonté se retrouve tout autant en didactique des sciences. Par exemple, la notion de situation-problème, telle que développée en France dans les années 1990-2000 (e.g. Robardet, 2001), présente certaines proximités avec la théorie des situations didactiques de Brousseau, et est également fortement ancrée sur les travaux de Bachelard autour du concept d'obstacle épistémologique.

## 1.2. Spécificité des pratiques

Au-delà des savoirs, tel que l'explique aussi Brousseau, les mathématiques représentent quelque chose qui se fait, une activité qui prend vie et se forme dans l'action. Les questions de spécificité concernent aussi la nature de l'activité mathématique elle-même pour penser l'enseignement des mathématiques. À titre d'exemple, plusieurs travaux en didactique des mathématiques se sont intéressés de près ou de loin au développement de ce que Bauersfeld (1994) appelle une culture de mathématisation, où des pratiques particulières, spécifiques aux mathématiques, ont été mises en avant dans le travail en classe avec les élèves. En voici quelques-unes, associées à divers travaux :

- Les mathématiques engagent des *pratiques de communication* : le symbolisme est fort important en mathématiques, où son développement et son utilisation permettent de communiquer les mathématiques, mais aussi de faire des liens entre différentes idées, voire d'en créer de nouvelles ; l'écriture elle-même est beaucoup utilisée pour communiquer les mathématiques, pour les « mettre au propre », que ce soit à l'occasion de séminaires ou d'articles de revues ; un

---

<sup>3</sup> Cette notion de genèse artificielle n'est pas à confondre avec l'approche génétique de Toeplitz et encore moins avec celle d'épistémologie génétique de Piaget.

vocabulaire spécifique est souvent proposé, dans le but de nommer certaines idées, mais aussi d'établir certaines conventions d'usage rendant le discours mathématique cohérent dans son ensemble. Divers travaux en didactique des mathématiques ont en ce sens été développés sur l'utilisation du vocabulaire et des conventions en mathématiques (e.g. Salin et Brousseau, 1980 ; Hewitt, 1999) et sur les pratiques d'écriture et la symbolisation en numération et en algèbre (e.g. Bednarz et al., 1993), voire même sur la place du débat en salle de classe (e.g. Legrand, 1993).

- Les mathématiques engagent des *pratiques de justification et de validation* : l'argumentation et la justification ont une place centrale en mathématiques, faisant intervenir les questions d'induction et de déduction, voire menant au processus de preuve mathématique lui-même ; le processus de validation mathématique est aussi au cœur du développement de la discipline, où la confrontation des idées par les pairs et leur évaluation formelle permet de faire avancer le corps des connaissances mathématiques. Divers travaux ont en ce sens été développés sur les communautés de validation (e.g. Boaler, 1999 ; Lampert, 1990), sur les processus de preuve (e.g. Lakatos, 1976 ; Reid et Knipping, 2010), sur les patterns d'argumentation (e.g. Krummheuer, 1992 ; Voigt, 1985), ainsi que sur les normes sociales en classe de mathématiques (e.g. Cobb et al., 1994).
- Les mathématiques engagent des *pratiques de formulation et de résolution de problèmes* : faire des mathématiques se veut une activité centrée sur la construction et la résolution de problèmes, où l'exploration d'idées, de concepts et de situations mathématiques, voire toute tentative pour donner du sens et élaborer des explications en lien avec des concepts et idées mathématiques, sont des illustrations de formulation de questions, de problématisation et de résolution de problèmes. De nombreux travaux se sont intéressés à ces questions, que ce soit concernant la formulation de problèmes (e.g. Brown et Walter, 2005), l'utilisation d'heuristiques (e.g. Polya, 1957), le processus et les démarches de résolution de problèmes (e.g. Schoenfeld, 1992), ainsi que des pratiques spécifiques comme celle des problèmes ouverts (e.g. Arsac, Germain et Mante, 1988).
- Les mathématiques engagent des *pratiques de définition et de théorisation* : le besoin de développer des définitions (plus) précises des objets mathématiques permet aux mathématiques d'avancer et de s'enrichir, tout comme les nécessaires théories qui sont développées sur ces mêmes objets permettent de les travailler et de les conceptualiser. Divers travaux ont été centrés

précisément sur les pratiques de définition (e.g. Lakatos, 1976 ; Ouvrier-Bufferet, 2007), ainsi que sur l'utilisation des théories (e.g. Papert, Ch.5, 1980 ; ou encore Sierpinska, 2004).

Bien d'autres exemples pourraient être donnés sur des pratiques spécifiques en mathématiques, tels que les pratiques de modélisation ou celles relatives à la gestion des erreurs ou des intuitions. Il est aussi possible de penser aux phases proposées par Brousseau pour aborder les situations en classe de mathématiques, inspirées de près ou de loin par les étapes du travail du mathématicien, avec les phases d'action, de formulation, de validation et d'institutionnalisation. Cette spécificité des pratiques mathématiques montre tout simplement que les mathématiques ne se font pas de n'importe quelle manière et que ces manières sont tout autant constitutives de la discipline que le sont les savoirs qui en découlent.

Il en est de même pour les sciences qui engagent, comme les mathématiques, une variété de pratiques recoupant celles qui viennent d'être évoquées (communication, justification, validation, théorisation, etc.), même si les modes de validation et d'élaboration des connaissances peuvent différer entre ces disciplines (voir par ex. Munier et al., 2017, sur le rôle joué par la mesure dans l'élaboration des connaissances dans les deux disciplines). Nous pouvons pour les sciences, à titre d'exemple, évoquer les pratiques de modélisation qui occupent une place fondamentale en physique et en chimie. La question de la modélisation est de fait consubstantielle de ces disciplines, même si cette manière de penser l'activité du physicien ou chimiste est relativement récente. Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, de nombreux épistémologues décrivent en effet cette activité comme consistant à construire un dialogue entre champ empirique et champ théorique, les modèles étant considérés comme des intermédiaires entre ces deux champs (Walliser, 1977). Une part importante de l'activité des physiciens consiste ainsi à élaborer ou mobiliser des modèles permettant de représenter, de décrire et de prévoir les phénomènes physiques et chimiques, ces modèles ayant en outre un certain nombre de caractéristiques, l'une d'entre elles étant qu'ils sont susceptibles d'évoluer (e.g. l'évolution des modèles astronomiques ou du modèle de l'atome), une autre étant qu'ils ont des limites de validité. Cette place fondamentale de la modélisation se retrouve dans l'enseignement où cette pratique occupe une place de plus en plus importante. Les didacticiens des sciences ont d'ailleurs développés des modèles de l'articulation entre empirie et théorie ayant en outre des visées heuristiques pour la didactique. Ces modèles ont cela de spécifique qu'ils permettent de décrire à la fois le processus de modélisation et les phénomènes d'enseignement des sciences. Par exemple le modèle des deux mondes (Veillard et al. 2011), très utilisé en didactique des sciences, met en avant l'articulation entre monde des objets et événements et monde des théories et modèles. Ce modèle distingue ce qui relève, dans les deux mondes, d'une appréhension physique ou quotidienne des objets et

des évènements, permettant aussi de décrire les modes de raisonnements et les conceptions des élèves (Tiberghien et Vince, 2005).

Ainsi, pour les didacticiens des mathématiques comme pour les didacticiens des sciences, les questions relatives à l'enseignement sont aussi à passer à travers le filtre des pratiques de ces disciplines. En mathématiques, l'intention est alors de faire vivre ce que certains comme Lockhart (2009) et Papert (1980, 1993) nomment des pratiques mathématiques authentiques, qui permettent de plonger les élèves dans une expérience mathématique représentative des façons de faire en mathématiques. En sciences cela s'est traduit, notamment, par l'introduction des démarches d'investigation, sur lesquelles nous revenons plus tard, visant à faire vivre aux élèves des pratiques proches de celles des scientifiques.

### **1.3. Spécificité épistémologique**

En troisième lieu se situe la spécificité épistémologique de la discipline, c'est-à-dire les dimensions relatives à la nature des mathématiques, à ce qu'elles sont. La vision épistémologique de la discipline par les didacticiens, souvent fort contrastée aux visions usuelles rencontrées dans la vie de tous les jours, occupe une place importante dans les réflexions relatives aux questions d'enseignement des mathématiques. Bien que souvent située en arrière-plan et rarement mise explicitement en avant, cette spécificité épistémologique joue un rôle dans les travaux des didacticiens des mathématiques (un peu à la manière de vieux fantômes qui gravitent sans faire de bruit autour du didacticien). Qui plus est, il est ici autant question de dimensions qui font consensus dans la communauté que de dimensions qui font encore débat. Ainsi, cette spécificité épistémologique ne concerne pas uniquement les dimensions qui ont permis historiquement de former la discipline et qui font consensus. Elle concerne tout autant ce qui continue de se dire et de se vivre relativement à la discipline, c'est-à-dire ce qui contribue à modeler la discipline mathématique au jour le jour : les mathématiques étant une discipline dynamique et mouvante, développant son histoire en temps réel à travers les divers acteurs qui font des mathématiques au quotidien. Voici quelques exemples de dimensions qui font consensus au plan épistémologique :

- Les mathématiques sont une activité ;
- Les mathématiques sont une science en évolution (et non une science morte) ;
- Les mathématiques pures se distinguent des mathématiques appliquées, mais toutes deux font partie de la discipline à part entière ;
- La statistique se démarque des mathématiques comme discipline, bien qu'elle s'y veut fortement reliée ;



- Les mathématiques scolaires ne sont pas nécessairement une copie réduite des mathématiques avancées et possèdent des objectifs différents.

Voici maintenant d'autres exemples de dimensions épistémologiques, synthétisées sous forme de questions, qui continuent à faire débat et forment le territoire épistémologique actuel des mathématiques :

- Est-ce que les mathématiques représentent la « reine » des sciences ou sont-elles au service de celles-ci ?
- Est-ce que les mathématiques s'appuient sur des bases solides ou sont-elles aux prises avec des failles dans leurs fondements ?
- Est-ce que la logique est une sous-discipline mathématique ou est-ce que les mathématiques ne sont que de la logique ?
- Est-ce que les mathématiques sont le produit d'une invention humaine ou sont-elles plutôt découvertes par les mathématiciens au fil des années ?
- Est-ce que les mathématiques sont plurielles (LES mathématiqueS) ou est-elle singulière (LA mathématique) ?

Des points d'épistémologie, qui font consensus concernant la nature des connaissances et de l'activité scientifiques, se retrouvent également en sciences (Bächtold et al., 2019) : l'ancrage empirique des sciences, le mythe de la méthode scientifique unique, le rôle fondamental des problèmes, le caractère provisoire des connaissances scientifiques, les interactions sciences-société, la distinction modèle/réalité, la charge théorique des données, et enfin le rôle des erreurs et des interactions entre les scientifiques dans le développement des sciences. Comme en mathématiques, d'autres points sont toujours en débat au sein de la communauté scientifique, par exemple : « réalisme versus instrumentalisme » concernant le rôle des modèles, ou « relativisme (ou non) » sur l'influence du contexte socio-économique et culturel.

Ces consensus et débats forment les disciplines mathématiques et scientifiques. Loin d'être des perspectives philosophiques de tour d'ivoire, ces spécificités épistémologiques orientent quotidiennement ce qui se pense et se fait dans les disciplines et chez les didacticiens. Les perspectives épistémologiques relatives aux mathématiques et aux sciences font en ce sens tout autant partie des mathématiques et des sciences elles-mêmes que le sont les savoirs et les pratiques de ces disciplines. Elles orientent de façon importante ce qui peut être pensé et réfléchi relativement aux questions d'enseignement pour chacune des deux disciplines.

Ces réflexions sur la spécificité des disciplines constituent pour nous des fondements relatifs aux mathématiques et aux sciences, et aux didactiques

associées. Sans nécessairement les rendre toujours explicites, ces fondements sont constamment présents pour nous, en arrière-plan, dans la suite de nos propos. La dimension qui nous anime ici, en tant que didacticiens, est de mieux comprendre le rôle que peuvent jouer la reconnaissance de ces spécificités disciplinaires pour les questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants. Voilà une autre question d'envergure qui oriente le travail présenté ci-après et nous invitons ici aussi le lecteur à la garder en tête dans la suite de sa lecture.

## **2. Pratiques, connaissances et formation des enseignants**

Notre trame de fond ainsi présentée, nous abordons maintenant le cœur de notre travail relatif aux pratiques, connaissances et formation des enseignants en mathématiques et en sciences. Tout comme la plénière qui l'a précédé, l'écrit qui suit est structuré en trois temps distincts couvrant les thématiques suivantes : (1) Finalités de l'enseignement ; (2) Connaissances et pratiques ; (3) Modèles de formation. Chacun de ces temps est guidé par notre question centrale, présentée précédemment, à savoir comment ces thématiques peuvent être informées et abordées par les travaux de recherche. Après chacune des thématiques, une ouverture est offerte à travers une sous-thématique additionnelle. Issues de travaux en didactique, ces sous-thématiques sont le fruit d'autres types de travaux qui ont le potentiel de déclencher des espaces de réflexions supplémentaires, c'est-à-dire qu'elles sont issues de travaux en didactique qui n'ont pas initialement été pensés pour aborder les questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants. Elles sont présentées dans une perspective non pas d'éléments tangibles à travailler avec ou pour les enseignants, mais plutôt sous l'angle du développement de sensibilités pouvant jouer un rôle sur ces questions.

### **2.1. Temps 1 : finalités de l'enseignement des mathématiques et des sciences**

Deux rapports ont eu un impact considérable sur les politiques publiques mises en œuvre depuis le début du XXI<sup>ème</sup> siècle pour l'enseignement des sciences en Europe. Il s'agit d'un rapport de l'OCDE (1999) et d'un rapport de la commission européenne Eurydice (2006). Les objectifs mis en avant dans ces rapports relèvent à la fois de la construction des savoirs scientifiques et de la compréhension de la nature même des sciences : « Selon l'OCDE (1999), l'enseignement scientifique devrait permettre aux élèves : de saisir les grandes lignes de pensée qui permettent de comprendre des aspects du monde qui les entoure [...] de comprendre, de façon élémentaire, ce qu'est la science [...] » (Boilevin, 2017, pp. 210-11). Dans un contexte de désaffection pour les études scientifiques à l'échelle mondiale, ces rapports mentionnent également le rôle majeur des sciences dans nos sociétés et la nécessité de former les scientifiques de demain. Du point de vue de la recherche, la question des finalités de l'enseignement des sciences a été largement étudiée. Dans ses travaux, Boilevin (2013, 2017) montre qu'après des débats parfois vifs sur les

finalités de l'enseignement des sciences, un consensus autour de la dimension culturelle du savoir scientifique a émergé, et de ceci découle une définition de la culture scientifique (ou littéracie scientifique) :

le terme de culture désigne la capacité de s'engager efficacement dans certains aspects de la vie moderne, de disposer des connaissances et des compétences nécessaires à chacun d'eux – qui ne sont pas celles des futurs spécialistes ou des individus qui en feront un usage professionnel dans un domaine scientifique. Il signifie que l'on est au fait des grands domaines et orientations de la science, de sa nature et de ses limites, de ce qu'est la démarche scientifique, mais aussi que l'on est capable de mettre à profit ces connaissances pour prendre des décisions en tant que citoyen éclairé et impliqué. (Harlen et Allende, 2009, p. 5, cité dans Boilevin, 2017, pp. 211-212).

Il s'agit donc à la fois pour les élèves d'apprendre les sciences, d'apprendre sur les sciences, de former des scientifiques, de former des citoyens, notamment dans une perspective d'éducation à, et d'acculturer les élèves aux pratiques scientifiques, ce qui inclut l'appropriation de pratiques langagières spécifiques à la discipline (Jaubert et Rebière, 2000), par exemple celle des normes de l'argumentation (Bächtold et al., 2022). Ces objectifs sont par nature spécifiques de la discipline, qu'il s'agisse des connaissances disciplinaires et épistémologiques ou des pratiques qui sont l'enjeu des situations d'enseignement. Tout ceci a des conséquences sur les approches de l'enseignement des sciences prescrites par les institutions et développées par les chercheurs en didactique. Cela se traduit par une évolution des curricula avec l'introduction dans de nombreux pays d'un enseignement des sciences fondé sur l'investigation ou *Inquiry Based Science Education* (IBSE ; voir Boilevin, 2013, et Venturini et Tiberghien, 2012), même s'il n'y a pas de consensus pour définir cet enseignement et s'il se décline de manière différente selon les pays (Dell'Angelo et al., 2012).

En France, c'est une déclinaison particulière de l'IBSE qui est retenue, au départ, dans les programmes de l'école primaire de 2002 (MEN, 2002), suite au plan de rénovation des sciences à l'école (MEN, 2000). Il est question de la (ou des) démarches d'investigation (DI). Dans les textes accompagnant ces programmes (MEN, 2002), la DI est définie comme obéissant à deux principes : unicité (elle s'articule sur le questionnement des élèves sur le monde réel) et diversité (elle repose sur une investigation réalisée par les élèves de différents types : expérimentation directe, réalisation matérielle (construction d'un modèle, recherche d'une solution technique), observation directe ou assistée par un instrument, recherche sur documents, enquête et visite). Il est précisé que « Ce questionnement conduit à l'acquisition de connaissances et de savoir-faire, à la suite d'une investigation menée par les élèves guidés par le maître » (MEN, *ibid.*, p. 6). Ces DI ont ensuite « diffusé » dans l'enseignement secondaire (programmes

du collège, MEN, 2005 ; du lycée, MEN, 2010) avec l'apparition d'un canevas en 7 étapes :

choix d'une situation – problème par le professeur ; appropriation du problème par les élèves ; formulation de conjectures, d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles ; investigation ou résolution de problème conduite par les élèves ; échange argumenté autour des propositions élaborées ; acquisition et structuration des connaissances ; opérationnalisation des connaissances. (MEN, 2005, pp. 6-7).

L'introduction de ce canevas de la DI a parfois eu des effets délétères et a conduit dans beaucoup de classes à des pratiques stéréotypées. Dans celles-ci, les élèves, au lieu d'être en situation de recherche, suivaient une liste linéaire d'étapes, en contradiction avec les fondements mêmes de la DI qui revendique une certaine proximité avec les pratiques des scientifiques. Notons que ce canevas en 7 étapes est une particularité des programmes français, la définition de l'IBSE n'étant pas aussi « cadrée » dans la plupart des autres curricula. Dans le texte du *National Research Council* paru aux États-Unis en 1996, par exemple, il est précisé que les élèves doivent investiguer des questions authentiques générées à partir de leurs expériences, mais les textes ne précisent pas quelles sont les étapes de cet enseignement et quelle forme particulière doit prendre l'investigation. Une autre différence notable est à relever : en France, si les enjeux d'apprentissage concernant le fonctionnement des sciences sont mentionnés dans les introductions des programmes ou dans des textes complémentaires (documents d'accompagnement des programmes, par exemple), les éléments d'épistémologie qui doivent être travaillés avec les élèves ne sont pas énumérés (contrairement aux programmes de sciences américains, par exemple).

De nombreuses recherches ont toutefois pointé des difficultés importantes des enseignants à mettre en œuvre ces DI dans leurs classes. Par exemple, dans certains cas, les DI s'apparentent à des « coquilles vides » (Marlot, 2014), les phases de problématisation sont peu présentes et les situations « déclenchantes » occupent un temps démesuré au détriment des autres phases. Des difficultés de mise en œuvre à différents moments des DI ont également été relevées concernant la gestion des hypothèses des élèves (Calmette, 2009), la gestion pédagogique de phases où les élèves sont en autonomie, ou encore la gestion des phases de conclusion (Morge et Dolly, 2013). D'autres auteurs ont montré des difficultés d'interprétation des textes officiels (Mathé et al., 2008), ou encore le fait que certains « types » d'investigation sont sous-représentés (notamment les activités de modélisation). D'autres recherches montrent des difficultés des enseignants à articuler le niveau empirique et le niveau des théories ou des modèles (voir Kermen, 2018, en chimie, et Chesnais et Munier, 2016, en physique). La question des origines potentielles de ces difficultés a donné lieu à plusieurs écrits en didactique des sciences (Marlot et Morge, 2016). Ceux-ci mettent en avant la modification des pratiques que ces

démarches nécessitent et le changement de statut de l'enseignant qu'elles impliquent. Un débat a notamment agité la communauté concernant le guidage de l'enseignant. Ce débat a été lancé par un article de Kirschner et al. (2006), qui affirment que les DI, supposément faiblement guidées, confrontent l'élève à un trop grand nombre d'informations à gérer, surchargeant leur mémoire de travail et empêchant l'accumulation de connaissances dans la mémoire à long terme. Ce débat a conduit à un relatif consensus sur le fait que les DI nécessitent un guidage de l'enseignant notamment en ramenant la question sur celle des finalités de l'enseignement des sciences et des DI (Hmelo-Silver et al., 2007), qui ne visent pas uniquement l'acquisition de connaissances, mais également une acculturation aux pratiques spécifiques de la discipline et à la compréhension de la nature des sciences. Ce débat sur la pertinence des DI a été relancé par les résultats des enquêtes PISA et TIMSS de 2015, dont une première lecture a conduit à la remise en cause de la pertinence de la DI pour l'enseignement des sciences. D'autres analyses nuancent ces résultats en pointant notamment sur l'importance du guidage de l'enseignant (Aditomo et Klieme, 2020), corroborant des recherches antérieures sur le guidage (Furtak et al., 2012 ; Lazonder et Harmsen, 2016). La question qui se pose aujourd'hui, et qui a des conséquences en termes de formation, n'est plus posée en termes de nécessité ou non du guidage mais plutôt en termes de fonction, du type de guidage nécessaire à l'élève, du moment et de l'intensité de ce guidage. Si pour l'instant ces débats ne conduisent pas à une remise en cause des DI, celles-ci ne sont plus aujourd'hui aussi présentes dans plusieurs programmes français qu'elles ne l'étaient. Ainsi, d'autres méthodes d'enseignement sont évoquées, même si les finalités affichées de l'enseignement des sciences restent celles pour lesquelles les DI ont été introduites, et renvoient aux trois spécificités évoquées dans la partie 1 de cet article, soit construire les savoirs spécifiques, s'acculturer aux pratiques scientifiques et identifier les spécificités épistémologiques des disciplines.

Reliées fortement à la spécificité des mathématiques, les pratiques d'enseignement par résolution de problèmes, proches des DI, se passent de présentation en mathématiques et provoquent en ce sens peu de débats. D'une part, les études s'attardant à montrer les retombées « positives » de la résolution de problèmes sur le travail mathématique des élèves sont nombreuses (voir l'analyse réalisée dans Proulx, 2019a). D'autre part, et au-delà de ces retombées, la place de la résolution de problèmes dans l'enseignement ne se présente pas comme une simple option d'enseignement parmi tant d'autres, mais bien comme étant au cœur de ce que signifie « faire des mathématiques » (tel que souligné à la partie 1). Ces considérations sur la résolution de problèmes ont évidemment des retombées sur les questions suivantes de connaissances et de formation des enseignants, tel qu'abordé plus loin (voir aussi Proulx, 2019b, sur ces questions).

***Première ouverture : le développement d'une sensibilité envers le caractère dynamique des mathématiques et des sciences***

Une première ouverture, ici sur la question des finalités de l'enseignement, concerne la sensibilisation à la nature dynamique des mathématiques et des sciences. Cette sensibilisation ne se traduit pas en termes de contenus tangibles, mais reste au niveau d'une certaine perspective, d'un certain rapport au savoir (Charlot et al., 1992), voire d'une position épistémologique envers la spécificité de la discipline. Tel que souligné plus haut, pour les didacticiens, la nature de ce que sont les mathématiques ou les sciences apparaît fondamentale pour penser les questions d'enseignement. Si en physique ou en chimie le caractère dynamique de ces disciplines ne fait pas réellement question, de par la nature même du statut des connaissances construites dans ces disciplines (voir plus haut sur la modélisation), la question peut mériter d'être davantage discutée en mathématiques. À l'opposé d'une pensée courante qui les stigmatise et les voit comme étant une discipline rigide, fixée et déjà toute pré-décidée pour être internalisée ou acquise par les élèves, les didacticiens des mathématiques conçoivent les mathématiques de façon dynamique et vivante, soit en constante évolution. Cette vision des mathématiques peut paraître évidente lorsqu'il est question des mathématiciens qui tentent de faire avancer le corps des connaissances mathématiques par leurs travaux et recherches. Toutefois, les didacticiens des mathématiques conçoivent tout autant les mathématiques scolaires, dites élémentaires, que celles dites avancées comme étant évolutives et pouvant constamment s'approfondir (ce propos est davantage étayé dans Proulx, 2023). Les mathématiques sont conçues en tant qu'activité émergente, qui se déploie dans l'action de façon contingente aux problèmes confrontés, aux questions posées et aux besoins ressentis par ceux qui les font. Les mathématiques sont une activité ou encore une quête constante productrice de sens, ce que les anglophones appellent un *meaning-making endeavour*. Le pionnier didacticien québécois Claude Janvier avait une expression à cet effet, soit « La mathématique qui se fait plutôt que la mathématique toute faite » (Bednarz et al., 1998).

C'est en particulier en considérant les travaux faits avec les élèves en salle de classe que cette considération dynamique et créative de l'activité mathématique devient des plus saillantes. Lorsque des didacticiens travaillent en classe avec les élèves, par exemple, ou encore dans leurs pratiques de formation, les mathématiques ne sont pas présentées comme un ensemble de concepts et de méthodes pré-décidées ou toutes tracées d'avance. Bien sûr les didacticiens des mathématiques n'affirment pas que rien n'est connu ou établi au plan mathématique et que tout est à (re-)faire. L'idée repose surtout dans cette conviction, cette sensibilité, envers le fait que même les mathématiques étudiées à l'école sont dynamiques, en évolution, et continuent de s'enrichir. Il est fréquent pour un didacticien de pointer plusieurs stratégies utilisées et développées par les

élèves, qui sont impossibles à anticiper et qui communiquent des mathématiques tout à fait novatrices et inspirantes. Les élèves nous mènent souvent hors des sentiers battus, dans des endroits fascinants et inspirants mathématiquement, qui peuvent élargir nos conceptions et compréhensions des mathématiques elles-mêmes, même celles scolaires. Un autre exemple saillant concerne les exercices d'analyse conceptuelle des didacticiens, qui regorgent d'avancées et d'approfondissements mathématiques autour de divers concepts aussi élémentaires ou avancés soient-ils (des nombres aux fractions, en passant par l'algèbre, la statistique, la géométrie, etc.). Ces analyses conceptuelles, fortement mathématiques, illustrent ce caractère dynamique des mathématiques, où les concepts étudiés permettent de montrer combien encore nous pouvons en comprendre mathématiquement, même pour des concepts des plus élémentaires (voir Mégrouèche, 2022, sur ce point, ou encore notre idée de mathématiques de la didactique dans Proulx, 2012). En bref, pour les didacticiens des mathématiques, il y a un monde mathématique qui continue à être pensé, compris, travaillé, etc. ; et non uniquement un monde à copier, répéter, refaire, redire, etc. Encore une fois, pour le didacticien des mathématiques, faire des mathématiques, et ce, à tout âge et dans tout contexte, engage à cette quête incessante productrice de sens.

Au-delà des questions de connaissances, pratiques et formation des enseignants, le développement de cette sensibilité implique une acceptation théorique que les mathématiques, et les sciences, sont dynamiques et non statiques, ni prédéfinies et déjà écrites. Le défi se situe davantage au plan du rapport au savoir, à la considération de ce qu'est et implique la discipline (mathématique et scientifique) elle-même, et les retombées de tout ceci pour l'école et le travail avec les élèves. La sensibilisation à cette perspective semble pouvoir jouer un rôle central et se loger au cœur des questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants.

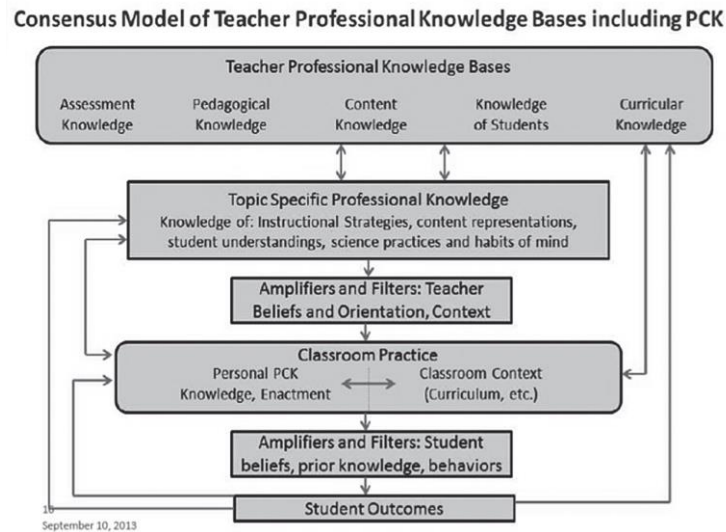
## **2.2. Temps 2 : connaissances et pratiques des enseignants**

Sur le plan théorique, nous nous appuyons sur trois hypothèses, largement partagées. Dans un premier temps, nous considérons que les pratiques enseignantes mettent en jeu des connaissances, notamment des connaissances *didactiques*. Dans un second temps, que l'enseignant agit en fonction d'une théorie-en-action, ancrée dans sa réflexion de praticien, tel que Schön (1993) la présente. Troisièmement, que la pratique (enseignante) est mobilisée dans l'action et qu'elle est située comme la présente Lave (1988), relative à un contexte, un moment et des situations qui la font vivre et lui donne un sens (voir notre analyse dans Bednarz et Proulx, 2009, 2017). Comme le pointe Kermen et al. (2017), s'intéresser aux connaissances didactiques des enseignants « vise à comprendre d'une part si et comment elles influencent les pratiques, d'autre part comment elles se développent pour, à terme, concevoir des dispositifs de formation qui puissent favoriser leur développement »

(p. 9). La question de la nature de ces connaissances et de leur lien avec les pratiques enseignantes est largement débattue dans la communauté des chercheurs en didactique des sciences et des mathématiques : voir par exemple le numéro thématique de la revue *For the Learning of Mathematics* (2009), celui dans les *Annales de Didactique et des Sciences Cognitives* (2022) ou encore dans la revue *Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies* (2017), dans lequel Kermen et Izquierdo-Aymerich proposent une synthèse des écrits sur les connaissances didactiques des enseignants en sciences et leurs liens avec ce que les Anglo-saxons appellent les *Pedagogical Content Knowledge* (PCK). Depuis les premiers travaux de Shulman (1986), cette notion de PCK a pris une place importante en didactique des sciences. Il s'agissait au départ de catégoriser les différentes connaissances nécessaires pour enseigner un contenu donné. Cette approche s'appuie sur deux hypothèses : d'une part, il existerait un ensemble de savoirs spécifiques à l'enseignement (qui permet de distinguer un enseignant d'une discipline donnée d'un simple expert du domaine), d'autre part, ces savoirs seraient nécessaires pour enseigner « efficacement » cette discipline. Ces travaux ont été à l'origine de 40 ans de recherche sur les PCK et ont donné lieu à de nombreux débats sur la nature de ces PCK et les méthodologies permettant de les inférer, ainsi qu'à différentes catégorisations (e.g. Magnusson et al., 1999) qui distinguent les connaissances sur les difficultés des élèves, les stratégies d'enseignement, l'évaluation, les curricula, ces quatre composantes étant chapeautées par une composante « orientation pour l'enseignement des sciences ».

La multiplicité des approches, des modèles et des théories qui sous-tendent les recherches sur les PCK ont conduit un collectif de chercheurs à tenter de produire un modèle permettant de rendre compte des travaux réalisés au sein de différentes équipes de recherche. Cela a conduit au modèle de Gess-Newsome (2015, figure 2), dans lequel les pratiques d'un enseignant sont vues sous l'angle de l'interaction entre le contexte de la classe et les « PCK personnelles » de l'enseignant, ces PCK personnelles ayant une composante « connaissances » et une composante d'action (« knowledge, enactment »). Cependant, ce modèle, qui parle de filtre et d'amplificateurs pour expliquer l'absence de liens directs et descendants entre connaissances et pratiques, ne précise pas la nature des PCK, ni le fonctionnement de ces filtres. En d'autres mots, il ne permet pas réellement de clarifier le rapport entre connaissances et pratiques en contexte d'enseignement.





**Figure 2.** Modèle de PCK de Gess-Newsome (2015) en enseignement des sciences

La manière de penser les *connaissances didactiques* des enseignants diffère de l'approche anglo saxonne en termes de PCK, notamment parce qu'elle s'appuie sur une distinction entre savoir (« construction sociale et culturelle qui vit dans une institution ») et connaissance (« ce que le sujet met en jeu lorsqu'il investit une situation ») (Laparra et Margolinas, 2010), inexistante en anglais. Faire cette distinction amène à distinguer les PCK pensées comme des propositions sur lesquelles existerait un certain consensus (celles-ci pourraient aussi être qualifiées de savoirs de référence pour l'enseignement), et les PCK pensées comme des règles d'action qui piloteraient les pratiques des enseignants. Les modèles de PCK (au sens large) renvoient ainsi à des définitions variées des connaissances didactiques des enseignants : des connaissances « canoniques » (ou savoirs), des connaissances partagées par une communauté de pratiques, des connaissances personnelles, des connaissances « mises en œuvre ». Différents travaux montrent une absence de liens directs et descendants entre connaissances et pratiques, une dialectique entre différents types de connaissances, et par une intrication entre le versant « connaissances » et le versant actionnel des pratiques enseignantes (Crahay et al., 2010 ; Chesnais et al., 2017). De la même façon, les travaux en didactique des mathématiques se sont fortement positionnés en faux face aux idéologies mécanistes de cause-à-effet reliant les connaissances des enseignants aux pratiques en classe (et ensuite aux performances des élèves). Les réflexions sur les liens entre connaissances et pratiques ont davantage été proposées en termes d'articulation variée d'influences (disciplinaires, didactiques, pédagogiques, institutionnelles ; voir les synthèses dans Bednarz et Proulx, 2009, 2017). Tous ces éléments ont fortement mené aux développements de travaux tentant de saisir ou

apprécier la pratique enseignante dans son ensemble, sa dynamique et sa cohérence, tout en tentant d'avancer sur les questions relatives aux pratiques de formation voulant s'arrimer à la complexité de la pratique elle-même (tel qu'abordé au Temps 3).

Pour tenter de mieux prendre en compte la relation entre connaissances et pratiques, plusieurs chercheurs français en didactique des sciences ont tenté de croiser le cadre des PCK (ou ceux qui parlent de connaissances didactiques) avec d'autres cadres, souvent ancrés en théorie de l'activité. Du côté la didactique professionnelle, Pastré (2007) considère que ce qui organise les pratiques doit plutôt être appréhendé en termes de schèmes ou de compétences – « embarquant » des connaissances, mais qui ne peuvent pas être considérées de manière isolée. Les travaux initiaux de Cross (2010) permettent de croiser le cadre des PCK avec celui de la théorie de l'action conjointe en didactique. Ceux de Jameau (2015) considèrent les PCK comme les composantes d'un schème. Citons aussi Kermen (2015), pour qui les PCK relèvent de la composante personnelle dans le cadre de la double approche didactique et ergonomique des pratiques (Robert et Rogalski, 2002). Pour une synthèse de ces travaux, voir Cross (2022) qui propose en outre une nouvelle manière d'articuler PCK et schèmes.

À ces discussions et travaux s'ajoutent des considérations sur les connaissances épistémologiques des enseignants. Initialement certains chercheurs ont pu penser que le développement de ces connaissances pouvait avoir une influence directe sur leurs pratiques et le développement de la vision des sciences des élèves (rappelons qu'il s'agit d'un enjeu des DI), mais là encore de nombreuses recherches ont pointé une absence de liens directs et descendants (Waters-Adams, 2006 ; Munier et al., 2016). Il n'est en outre pas possible de positionner les enseignants sur des profils épistémologiques bien définis à partir de l'analyse de l'activité des scientifiques : les enseignants peuvent être experts sur certains points d'épistémologie et novices sur d'autres, cette expertise pouvant de plus dépendre du contexte (Bächtold et al., 2019). Cela peut s'expliquer par le fait que leur vision des sciences s'est construite non pas (ou pas seulement) dans une pratique des sciences, mais aussi dans une pratique de *l'enseignement* des sciences. La cohérence dans les profils d'enseignants est donc à chercher également depuis la perspective de l'agir de l'enseignant.

#### ***Deuxième ouverture : le développement d'une sensibilité envers l'enseignement comme une intervention***

Relativement à la relation existant entre connaissances et pratiques, et l'articulation variée d'influences disciplinaires, didactiques, pédagogiques et institutionnelles, cette deuxième ouverture concerne la conception du rôle de l'enseignant dans l'action de la classe. Les didacticiens des mathématiques s'inscrivent dans une

perspective qui insiste sur la dimension active de l'enseignant en salle de classe. Par exemple, pour Bednarz (e.g. Bednarz, Gattuso et Mary, 1995), la formation initiale et continue à l'enseignement a pour but de former à l'intervention en classe de mathématiques et non pas de former à l'enseignement des mathématiques (comme un jeu d'exposition de savoirs). Cette distinction est importante, car il n'est pas ici question d'aider les enseignants à mieux transmettre des contenus mathématiques aux élèves, mais plutôt de former ceux-ci à intervenir, dans l'action, en fonction des événements de la classe et des élèves (cette perspective est davantage détaillée dans Proulx, 2019b). En ce sens, plusieurs didacticiens conçoivent que le contexte d'enseignement par résolution de problèmes (ou par DI en sciences) s'avère porteur pour souligner cette distinction entre « enseigner » et « intervenir », où l'enseignant suite à la proposition d'une tâche à la classe est amené à intervenir sur les stratégies et solutions d'élèves (erronées ou pas), les idées qu'ils offrent et justifient, les questions qu'ils se posent, etc. Dans cette perspective d'intervention, le poids est directement mis sur les épaules de l'enseignant pour favoriser les raisonnements en classe. C'est à ce dernier d'intervenir sur « ce que les élèves produisent » pour tenter de saisir les opportunités émergentes, de construire sur les idées des élèves et de s'en servir pour travailler et faire avancer les mathématiques et sciences en classe. Dans cette perspective, les enseignants sont conçus comme des professionnels de l'intervention, et non des techniciens qui appliquent des recettes. Ceci redonne une dimension créative à la profession enseignante, dirait Papert (1980, 1993), car les enseignants ne sont pas restreints à suivre un script pré-décidé, mais doivent travailler avec ce qui émerge dans l'action et intervenir en fonction. Pour Papert, et s'inspirant des travaux de Lévi-Strauss (1962), ce passage en est un d'un enseignant « ingénieur », qui reproduit des techniques d'enseignement, à un enseignant davantage « bricoleur », qui travaille avec le matériel sous la main et en fonction de ce qui se produit en classe.

Cette perspective s'éloigne d'une vision de l'enseignement comme un processus linéaire de transmission. Prenant en compte la spécificité de la discipline, elle s'éloigne aussi des méthodes d'enseignement pour lesquelles des techniques dites éprouvées sont recommandées aux enseignants de toutes disciplines (enseignement explicite, stratégique, etc. ; voir les propos précédents sur la DI et l'analyse critique dans Proulx, 2017, 2019c). C'est, entre autres, une sensibilisation à la spécificité des mathématiques, comme science vivante et non « morte », qui mène les didacticiens à voir l'enseignement à travers ce prisme et qui permet de le penser comme un travail dynamique, vécu dans l'action et en réaction aux mathématiques qui se produisent sur-le-champ en classe. Ici encore, le défi de cette sensibilisation se situe au-delà des questions de connaissances, pratiques et formation des enseignants et convoque la vision même du travail enseignant. Voir les mathématiques de façon dynamique mène à accepter que tout n'est pas prévisible

ou scripté dans cette discipline, et considérer celle-ci sous l'angle de ses pratiques mène à penser que le travail mathématique se fait et s'adapte dans l'action. Il en va de même de leur enseignement, qui ne se déroule pas selon un script transférable d'une personne à l'autre et où tout est reproductible. L'enseignement des mathématiques est vu comme étant contingent aux situations données, aux élèves, à l'enseignant, etc., mais surtout aux mathématiques en elles-mêmes et à la façon dont elles sont abordées. La même chose peut être dite pour l'enseignement des sciences. La sensibilisation à cette vision de l'enseignement semble pouvoir jouer un rôle central et se loger au cœur des questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants.

### **2.3. Temps 3 : modèles de formation des enseignants**

Les questions relatives à la formation des enseignants ont déjà été quelque peu abordées, en filigrane, dans certains exemples évoqués précédemment relativement aux finalités de l'enseignement et à la manière dont les liens entre connaissances et pratiques des enseignants sont pensés. Toutefois, faire explicitement le saut de ces questions vers celles de la formation ouvre sur un terrain possiblement miné et polémique. Peut-être est-il sage à ce stade de soulever explicitement trois enjeux d'importance qui modulent la conception et la considération des recherches et leurs retombées sur les questions de formation des enseignants.

*Premièrement*, il a souvent été affirmé que la plupart des initiatives de formation étudiées *en recherche* sont bénéfiques aux enseignants : que ce soit des cours disciplinaires (mathématiques, scientifiques, didactiques), des activités d'observation, des confrontations entre praticiens, des communautés de pratiques, des participations à des projets de recherche ou de recherche-action, etc. Ces initiatives de formation sont alors considérées, au moins dans une certaine mesure, comme porteuses pour les enseignants. Ceci mène dans un certain cul-de-sac scientifique, où des distinctions sont difficiles à tracer et des choix complexes à considérer.

*Deuxièmement*, le contexte pris au sens large des enseignants *et* des formateurs semble jouer pour beaucoup dans la nature des retombées des formations étudiées. Les démarches de formation sont situées dans des positionnement théoriques particuliers, des démarches méthodologiques propres aux chercheurs, des conceptions de l'enseignement, etc. De la même façon, la nature des milieux scolaires des enseignants-participants, leurs disponibilités, leurs croyances, leurs motivations et engagements, les ressources mises à contribution, etc., jouent directement sur le type de retombées de ces mêmes formations. Tout ceci pour souligner que les considérations de « prescriptions » ou de « reproductibilité » sont en quelques sortes complexes et peuvent agir comme un frein au développement

des connaissances scientifiques sur les questions de formation des enseignants, ainsi qu'évidemment sur la mise en route de ces formations à grande échelle.

*Troisièmement*, les croyances et positionnements des formateurs jouent pour beaucoup sur la circulation des résultats de recherche dans le domaine. En d'autres mots, la majorité des chercheurs sont *aussi* des formateurs d'enseignants (en formation initiale et continue) et possèdent des perspectives et croyances comme praticiens-formateurs. Ceci a un impact en amont sur le choix des initiatives de formation étudiées par la recherche, mais aussi en aval sur la considération, dans leurs pratiques de formation, des résultats obtenus par d'autres chercheurs ayant d'autres fondements théoriques ou étant logés dans d'autres courants de pensées. Le choc interne entre le chercheur scientifique et le praticien-formateur peut être fort et influence la circulation des savoirs de toutes sortes relativement à la formation des enseignants. En d'autres mots, la discussion sur les questions de formation ne se fait pas uniquement entre chercheurs, comme elle peut se faire lorsqu'il est question des recherches relatives au travail mathématique ou scientifique des élèves, mais elle se fait souvent entre des chercheurs qui sont aussi la plupart du temps des formateurs ; et ceci intervient en même temps sur leur identité de praticien-formateur.

Ces trois enjeux étant soulevés, et il y en a sûrement d'autres, d'importants travaux sont toutefois réalisés sur les questions de formation. Ces recherches soulèvent les limites de dispositifs de formation « descendants », qu'ils soient pensés en termes de transmission de connaissances (voir la Partie 2 sur les liens entre connaissances et pratiques ; voir aussi Bednarz, 2000 ; Zaslavsky et al., 2003) ou en termes de transmission de situations (Houdement et Kuzniak, 1996 ; Munier et al., 2021). Ces modèles descendants sont en rupture avec les modèles qui se développent dans les recherches récentes en didactique sur le développement professionnel des enseignants, qui donnent une place croissante aux pratiques effectives des enseignants. Par exemple, plusieurs chercheurs défendent qu'il faut penser en termes d'enrichissement, plutôt que de transformation des pratiques, en donnant une place centrale aux pratiques des enseignants dans les initiatives de formation (Robert et Vivier, 2013). D'autres courants de recherche considèrent que le changement des pratiques d'enseignement nécessite une objectivation de ces pratiques (en suivant, par exemple, le modèle du praticien réflexif relié aux travaux de Schön, 1993). Des perspectives récentes s'appuient sur des dispositifs associant des chercheurs et des enseignants, c'est le cas par exemple des ingénieries coopératives (Sensevy et al., 2013), des ingénieries didactiques de développement et de formation (Perrin-Glorian, 2019), des initiatives du type *lessons studies* (Batteau et Clivaz, 2016) ou de certains dispositifs mis en œuvre dans le cadre des LéA (Allard et al., 2022) ou encore de collectifs moins formalisés (Chesnais, 2021). Comme le pointent Desgagné et al. (2001), ces recherches recouvrent un

ensemble de pratiques qui donnent lieu à différentes appellations, les frontières entre ces diverses identités de pratiques de recherche n'étant pas complètement étanches. Cependant, ces pratiques de recherche ont en commun de proposer de faire de la recherche « avec » plutôt que « sur » les enseignants et de « [voir] la participation des enseignants à la recherche comme une contribution essentielle au développement des connaissances liées à la pratique et, bien sûr, au développement de la pratique elle-même » (Desgagné et al., 2001, p. 35). La plupart de ces dispositifs s'appuient sur un processus itératif de réflexion, d'élaboration et de mise en œuvre par les enseignants de séances de classes et de retour réflexif sur cette mise en œuvre. Ils présentent toutefois une grande diversité, à la fois du point de vue des fondements théoriques qui les sous-tendent et des questions auxquelles ils permettent de répondre. Ces travaux amènent à interroger le rôle du chercheur et appellent de nouvelles recherches sur la manière dont circulent et se transforment les connaissances (disciplinaires et didactiques) dans ces dispositifs visant le développement professionnel des enseignants.

C'est en ce sens que les questions de formation des enseignants, et les recherches sur les modèles de formation, sont riches et non simplistes. Et, pour faire écho aux trois enjeux soulevés précédemment, ces orientations représentent les *tendances actuelles* en ce qui a trait aux modèles de formation des enseignants. Ainsi, autant d'autres initiatives et modèles ont longtemps été pensés et étudiés dans le domaine (e.g. en mathématiques, Blouin et Gattuso, 2000 ; Jaworski et al., 1999 ; Proulx et Gattuso, 2010 ; Even et Ball, 2008), autant d'autres pourront voir le jour et innover.

### *Troisième ouverture : le développement d'une sensibilité envers les mathématiques des élèves*

La sensibilité croissante envers l'enseignant comme acteur pertinent au cœur de sa pratique mène vers la considération de l'élève et sa propre pratique mathématique. Cette troisième ouverture est logée ici aussi dans la spécificité de la discipline mathématique et sa dimension dynamique. Elle concerne les mathématiques des élèves, soit une sensibilité au fait que l'élève *fait* des mathématiques en classe et tente de leur donner un sens. L'élève n'est pas vu par le didacticien comme étant un simple reproducteur de ce qui lui est dicté par un « expert » en classe. Le didacticien s'engage avec un réel intérêt sur le sens donné par les élèves, même si ce sens n'est pas toujours adéquat ou aligné avec celui que les « expert » auraient donné pour ces mêmes mathématiques. Pour le didacticien, ce sens que donne l'élève émerge justement d'une activité productrice de sens : l'élève fait des mathématiques. C'est cette activité productrice qui intéresse le didacticien des mathématiques, fréquemment bien au-delà de son simple caractère adéquat ou erroné.

Cette perspective envers les mathématiques que font les élèves exige de considérer, tel que le disait Piaget, que les enfants ne sont pas des petits adultes. En ce sens, que les compréhensions des élèves ne sont pas à concevoir comme étant, ou devant être, des modèles réduits de ce que les « experts » comprennent. Steffe (2017) insiste sur le fait que les mathématiques représentent des systèmes rationnels, et non absolus, et qu'ils sont pensés et se veulent cohérents. Pour Steffe, il en est de même des élèves, c'est-à-dire que l'activité mathématique des élèves possède souvent son propre rationnel, qui peut différer du nôtre, dit adulte ou expert, mais qui est tout de même à considérer comme un système rationnel et cohérent. Et, pour le didacticien, c'est ce système rationnel qu'il vaut la peine de scruter et de prendre en compte. Qui plus est, en considérant que les mathématiques scolaires sont vivantes, les mathématiques des élèves peuvent déceler des forces potentielles au plan mathématique et ouvrir la voie à de nouvelles idées. Ceci peut même mener à considérer que les élèves offrent des productions mathématiques à part entière ; erronées parfois, certes, mais qui ont leur source dans une activité mathématique authentique qui vaut la peine d'être comprise. En ce sens, au-delà des possibles erreurs qu'elle peut contenir, l'activité mathématique des élèves peut recéler un potentiel mathématique d'intérêt et même participer à faire réfléchir aux mathématiques elles-mêmes. C'est en fait une sensibilité qui oriente le travail de plusieurs didacticiens.

Cette sensibilisation envers l'intérêt des mathématiques des élèves, voire la force cognitive de ces derniers en mathématiques, exige parfois de se dégager des compréhensions mathématiques existantes en tant qu'unique point de référence valable et d'arriver à accepter de voir plus loin ou plus en profondeur au plan mathématique. Le défi de cette ouverture revient à accepter de développer une curiosité pour les façons de faire des élèves. Ce défi exige de laisser un peu de côté la seule lunette adulte ou experte pour se placer dans les souliers des élèves, de voir des possibilités mathématiques d'intérêt et comprendre la façon dont les mathématiques sont comprises *par eux*. Pour un enseignant, cette perspective invite à voir les mathématiques des élèves comme des ressources importantes pouvant contribuer aux réflexions sur (l'enseignement de) ces mathématiques. La sensibilisation aux mathématiques des élèves semble en ce sens pouvoir jouer un rôle central et se loger au cœur des questions de pratiques, connaissances et formation des enseignants.

### **Conclusion : interactions et affinités entre disciplines**

Quelles conclusions tirer de tout ceci ? Dans l'esprit du colloque, qui veut favoriser le dialogue et faire interagir les didactiques mathématiques et scientifiques, des constats s'imposent. Ceux-ci touchent notre thématique reliée aux enseignants, mais vont aussi au-delà au niveau des disciplines elles-mêmes.

*Sur la question de la spécificité des disciplines.* L'alignement de nos préoccupations en didactique des mathématiques et des sciences est fort sur cette question. Nos interactions comme didacticiens des deux disciplines ont été riches et en adéquation dès le début, permettant de raffiner des compréhensions mutuelles. Il y a là, pour nous, une filiation intéressante, qui semble nous rejoindre et qui peut former la base d'interactions importantes entre nos didactiques respectives. En particulier, la spécificité des mathématiques comme activité de résolution de problèmes soulève des enjeux importants touchant autant aux questions d'enseignement, de connaissances que de formation (voir la synthèse dans Proulx, 2019b). Ces enjeux relatifs aux spécificités des disciplines mathématiques et scientifiques demeurent tous deux à approfondir et à mieux comprendre.

*Sur la question des finalités de l'enseignement.* Les préoccupations et évolutions relatives aux finalités de l'enseignement des mathématiques et des sciences nous a semblé tout autant en adéquation. Bien que chacune des disciplines mathématiques et scientifiques aient vécu ses propres événements et subi diverses influences relatives à son enseignement (e.g. les mathématiques modernes, l'avènement de l'ISBE, la place des scientifiques, la résolution de problèmes), les expériences et perspectives coïncident tout de même bien et offrent des occasions de rapprochement qui peuvent permettre de dépasser un niveau superficiel de similitudes des approches.

*Sur les questions des connaissances-pratiques des enseignants.* Fort dans le monde anglophone, les notions de PCK et ses différentes déclinaisons sont peut-être moins présentes en didactique des mathématiques qu'elles ne le sont en didactique des sciences. Les critiques et interrogations soulevées en didactique des sciences, particulièrement relatives à la mécanisation des connaissances et pratiques des enseignants à travers ces modèles, moins vives en didactique des mathématiques, n'ont peut-être pas pris aussi fortement racine dans les travaux de recherche (quelques interrogations ont évidemment été soulevées). Ceci s'explique peut-être par la préoccupation en didactique des mathématiques autour de l'articulation des différentes composantes (didactiques, mathématiques, pédagogiques et institutionnelles, par exemple) dans la pratique enseignante (voir GREFEM, 2012 ; Proulx, 2011). Voilà ici une thématique qui est possiblement à creuser entre didacticiens des mathématiques et des sciences, où la dimension implicite des orientations didactiques est peut-être à mettre davantage à jour et à mieux comprendre (relativement aux travaux anglophones, par exemple).

*Sur les questions de formation des enseignants.* Le passage en didactique des sciences aux modèles davantage axés sur des modèles de formation « participatifs » trouve bien entendu écho en didactique des mathématiques (le modèle de Recherche Collaborative n'a-t-il pas été, en effet, « inventé » par Bednarz et son équipe dans les années 1990 ? voir Bednarz, 2013). Toutefois, cette perspective est



probablement moins étendue chez ses chercheurs. Tel que souligné, diverses traditions de formation (en mathématiques disciplinaires et en didactique, relativement aux nécessités et bases à acquérir pour enseigner) ont un long passé et peuvent permettre d'expliquer cette différence ainsi que la nature elle-même des disciplines mathématiques et scientifiques. L'explicitation ici aussi des diverses perspectives de formation entre didacticiens des mathématiques et des sciences apparaît comme un terrain fertile, tant pour l'approfondissement de ces perspectives de formation que pour l'établissement de points communs à exploiter.

Ces filiations et différences nous apparaissent motivantes et garantes d'occasions d'enrichissements mutuels dans un contexte d'interaction entre didactique des mathématiques et des sciences. Elles ne représentent toutefois qu'une première couche des possibles à prendre en compte, et qui pourrait faire émerger d'autres enjeux plus nuancés. En ce sens, ces filiations et différences sont autant d'occasions d'établir des ponts que de réaliser la présence de distances nécessaires entre nos disciplines, nous permettant de mieux se connaître l'une et l'autre, et soi-même, que de parfois se reconnaître l'une dans l'autre.

### Bibliographie

ADITOMO, A., & KLIEME, E. (2020). Forms of inquiry-based science instruction and their relations with learning outcomes: Evidence from high and low performing education systems. *International Journal of Science Education*, 42(4), 504-525.

ALLARD, C., HOROKS, J., & PILET, J. (2022). Principes de travail collaboratif entre chercheur·e·s et enseignant·e·s : le cas du LÉA RMG, *Education et Didactique*, 16-1, 49-66.

ARSAC, G., GERMAIN, G., & MANTE, M. (1988). *Problème ouvert et situation problème*. Lyon : IREM de Lyon.

BACHELARD, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin.

BÄCHTOLD, M., CROSS, D. & MUNIER, V. (2019). How to Assess and Categorize Teachers' Views of Science? *Research In Science Education*. 51, 1423-1435.

BATTEAU, V., & CLIVAZ, S. (2016). Le dispositif de formation continue lesson study: Travail autour d'une leçon de numération. *Grand N*, 98, 27-48.

BAUERSFELD, H. (1994). Réflexions sur la formation des maîtres et sur l'enseignement des mathématiques au primaire. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(1), 175-198.

BEDNARZ, N. (2000). Formation continue des enseignants en mathématiques: Une nécessaire prise en compte du contexte. In P. Blouin & L. Gattuso (Eds.),

*Didactique des mathématiques et formation des enseignants* (pp. 63-78). Montréal: Modulo.

BEDNARZ, N. (Eds.) (2013). *Recherche collaborative et pratique enseignante : regarder ensemble autrement*. L'Harmattan : France.

BEDNARZ, N., DUFOUR-JANVIER, B., POIRIER, L., ET BACON, L. (1993). Socioconstructivist viewpoint of the use of symbolism in mathematics education. *The Alberta Journal of Educational Research*, 39(1), 41-58.

BEDNARZ, N., GATTUSO, L., & MARY, C. (1995). Formation à l'intervention d'un futur enseignant en mathématiques au secondaire. *Bulletin AMQ*, 35(1), 17-30.

BEDNARZ, N., GOLDIN, G., & LEFEBVRE, J. (1998). In memoriam – Claude Janvier. *Journal of Mathematical Behavior*, 17(2), v-vii.

BEDNARZ, N., & PROULX, J. (2009). Knowing and using mathematics in teaching: Conceptual and epistemological clarifications taking their source in teachers' practice. *For the Learning of Mathematics*, 29(3), 11-17.

BEDNARZ, N., & PROULX, J. (2017). Teachers' mathematics as mathematics-at-work. *Research in Mathematics Education*, 19(1), 42-65.

BLOUIN, P., & GATTUSO, L. (dir.). (2000). *Didactique des mathématiques et formation des enseignants*. Montreal: Modulo.

BOALER, J. (1999). Participation, knowledge and beliefs: a community perspective on mathematics learning. *Educational Studies in Mathematics*, 40, 259-281.

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 ? Dans M. Bächtold, V. Durand-Guerrier & V. Munier (dir.), *Épistémologie & didactique* (pp. 195-220). Presses universitaires de Franche-Comté.

BROUSSEAU, G. (1988). Fragilité de la connaissance et fragilité du savoir. Conférence donnée au CIRADE [VHS]. Montréal, Canada: UQÀM/CIRADE.

BROUSSEAU, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. La pensée sauvage.

BROWN, S. I., & WALTER, M. I. (2005). *The art of problem posing*. NY: Routledge.

CALMETTES, B. (2009). Démarche d'investigation en physique. Des textes officiels aux pratiques en classe. *Spirale*, 43, 139-148.

CHARLOT, B., BAUTIER, É., & ROCHEX, J.Y. (1992). *École et savoir dans les banlieues et ailleurs*. Paris: Armand Colin.

CHESNAIS, A. (2021). Enhancing classroom discourse about measure to foster a conceptual understanding of geometrical practices. *ZDM – Mathematics Education*, 53, 337–357.

CHESNAIS, A., CROSS, D. & MUNIER, V. (2017). Étudier l'effet de formations sur les pratiques en termes de connaissances : réflexion sur les liens entre connaissances et pratiques. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 15, 97-132.

CHESNAIS, A. & MUNIER, V. (2016). Mesure, mesurage et incertitudes : une problématique inter-didactique mathématiques / physique. Dans A.-C. Mathé & E. Mounier (dir.) *Actes du séminaire national de didactique des mathématiques* (pp. 212-237).

COBB, P., PERLWITZ, M., & UNDERWOOD, D. (1994). Construction individuelle, acculturation mathématique et communauté scolaire. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(1), 41-61.

CRAHAY, M., WANLIN, P., ISSAIEVA, É., & LADURON, I. (2010). Fonctions, structuration et évolution des croyances (et connaissances) des enseignants. *Revue française de pédagogie*, 172, 85-129.

CROSS, D. (2010). Action conjointe et connaissances professionnelles. *Éducation et didactique*, 4(3), 39-60.

CROSS, D. (2022). *Modélisation des connaissances professionnelles des enseignants de sciences à l'aide du couple schème-classe de situations*. [HDR]. Université de Toulouse.

DAHAN-DALMEDICO, A., & PFEIFER, J. (1986). *Une histoire des mathématiques : routes et dédales*. Seuil : France.

DELL'ANGELO M., COQUIDÉ M. & MAGNERON N. (2012). Statut de l'investigation dans des standards de l'enseignement scientifique. Dans B. Calmettes (dir.), *Didactique des sciences et démarches d'investigation* (pp. 27-58). L'Harmattan : France.

DESAGNE, S., BEDNARZ, N., LEBUIS, P., POIRIER, L. & COUTURE, C. (2001). L'approche collaborative de recherche en éducation : un rapport nouveau à établir entre recherche et formation. *Revue des sciences de l'éducation*, 27(1), 33–64.

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

EVEN, R., & BALL, D.L. (2008) (Eds.). *The professional education and development of teachers of mathematics: The 15th ICMI study*. US: Springer.

FOR THE LEARNING OF MATHEMATICS (2009), 29(3). Numéro thématique sur *Knowing and using mathematics in teaching*.

FURTAK, E., SEIDEL, T., IVERSON, H., & BRIGGS, D. (2012). Experimental and quasi-experimental studies of inquiry-based science teaching. *Review of Educational Research*, 82(3), 300–329.

GESS-NEWSOME J. (2015). A model of teacher professional knowledge and skill including PCK. Dans A. Berry, P. Friedrichsen & J. Loughran (dir.). *Re-examining Pedagogical Content Knowledge in Science Education*, (pp. 14-27). Routledge.

GREFEM. (2012). Formation didactique articulée à la pratique enseignante: Illustrations et conceptualisations. *Actes du colloque Espace Mathématique Francophone EMF-2012* (pp. 348-361). Genève, Suisse : EMF.

HARLEN W., ALLENDE J. E. (2009). *Pour une pédagogie d'investigation dans l'enseignement scientifique. Une synthèse à l'usage du monde de l'éducation*. <http://www.interacademies.net/CMS/Programmes/3123.aspx>

HEWITT, D. (1999). Arbitrary and necessary: a way of viewing the mathematics curriculum. *For the Learning of Mathematics*, 19(3), 2-9.

HMELO-SILVER, C.E., DUNCAN, R. G. & CHINN, C. A. (2007). Scaffolding and achievement in problem-based and inquiry learning. *Educational Psychologist*, 42(2), 99-107.

HOUEMENT, C. & KUZNIAK A. (1996). Autour des stratégies utilisées pour former les maîtres du premier degré en mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, 16(3), 289-322.

JAMEAU, A. (2015). Une étude des connaissances professionnelles des enseignants du point de vue de la didactique des sciences et de la didactique professionnelle. *Éducation et didactique*, 9(1), 9-31.

JAUBERT, M. & REBIERE, M. (2000). Observer l'activité langagière des élèves en sciences. *Aster*, 31, 173-195.

JAWORSKI, B., WOOD, T., & DAWSON, S. (dir.). (1999). *Mathematics teacher education: Critical international perspectives*. London: Falmer Press.

KERMEN, I. (2015). Studying the activity of two French chemistry teachers to infer their pedagogical content knowledge and their pedagogical knowledge. Dans M. Grangeat (dir.), *Understanding Science Teacher Professional Knowledge Growth*, (pp. 89-115), Rotterdam: Sense Publishers.

- KERMEN, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée : Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes*. PUR.
- KERMEN, I. & IZQUIERDO-AYMERICH, M. (2017). Connaissances professionnelles didactiques des enseignants de sciences. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 15, 9-32.
- KIRSCHNER, P., SWELLER, J., & CLARK, R. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work. *Educational Psychologist*, 41(2), 75-86.
- KRUMMHEUER, G. (1992, août). *Formats of argumentation in the mathematics classroom*. Texte présenté à ICME-7 (WG7: Language and communication in the mathematics classroom), Québec, Canada.
- LAKATOS, I. (1976). *Proofs and refutations*. NY: Cambridge University Press.
- LAMPERT, M. (1990). When the problem is not the question and the solution is not the answer. *American Educational Research Journal*, 27(1), 29-63.
- LAPARRA, M. & MARGOLINAS, C. (2010). Milieu, connaissance, savoir. Des concepts pour l'analyse de situations d'enseignement. *Pratiques*, 145-146, 141-160.
- LAVE, J. (1988). *Cognition in practice*, Cambridge University Press.
- LAZONDER, A., & HARMSSEN, R. (2016). Meta-analysis of inquiry-based learning: Effects of guidance. *Review of Educational Research*, 86(3), 681-718.
- LEGRAND, M. (1993). Débat scientifique en cours de mathématiques et spécificité de l'analyse. *Repères-IREM*, 10, 123-159.
- LEVI-STRAUSS, C. (1962). *La pensée sauvage*. Plon: France.
- LOCKHART, P. (2009). *A mathematician's lament*. Bellevue Literary Press: NY.
- MAGNUSSON, S., KRAJCIK, J., & BORKO, H. (1999). Nature, sources and development of pedagogical content knowledge for science teaching. Dans J. Gess-Newsome & N.G. Lederman (dir.), *Examining pedagogical content knowledge* (pp. 95-132), Dordrecht: Kluwer.
- MARLOT, C. (2014). *Contribution à la conception des nouveaux programmes dans le domaine des SVT pour le cycle 2 et le cycle 3*. [www.education.gouv.fr/csp/](http://www.education.gouv.fr/csp/)
- MARLOT, C & MORGE, L. (2016). *L'investigation scientifique et technologique. Comprendre les difficultés de mise en œuvre pour mieux les réduire*. Presses Universitaires de Rennes.

- MATHE, S., MEHEUT, M. & DE HOSSON, C. (2008). Démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 32, 41-76.
- MEGROURECHE, C. (2022). Contributions mathématiques en didactique des mathématiques. *Chroniques – fondements et épistémologie de l'activité mathématique*.
- MEN (2000). Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, 23.
- MEN (2002). Horaires et programmes d'enseignement de l'école primaire. Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, *Hors-Série 1*.  
<https://www.education.gouv.fr/bo/BoAnnexes/2002/hs1/hs1.pdf>
- MEN (2005). Programmes des collèges : introduction commune à l'ensemble des disciplines scientifiques. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, 5.  
<https://www.education.gouv.fr/bo/BoAnnexes/2005/hs5/annexe1.pdf>
- MEN (2010). Programmes de physique-chimie en classe de 2<sup>nd</sup> générale et technologie. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, 4.  
[https://cache.media.education.gouv.fr/file/special\\_4/72/9/physique\\_chimie\\_143729.pdf](https://cache.media.education.gouv.fr/file/special_4/72/9/physique_chimie_143729.pdf)
- MORGE, L. & DOLLY, A.-M. (2013). L'enseignement de notion de modèle : quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? *Spirale*, 52, 149-175.
- MUNIER, V., BÄCHTOLD, M., CROSS, D., MARTINEZ, L. & MOLVINGER, K. (2016). Vision des sciences et pratiques des enseignants en sciences à l'école élémentaire : un lien complexe et dialectique, *Actes des 9<sup>èmes</sup> rencontres de l'ARDIST*. Lens.
- MUNIER, V., CHESNAIS, A. ET MOLVINGER, K. (2017). La mesure en mathématiques et en physique : enjeux épistémologiques et didactiques. Dans M. Bächtold, V. Durand-Guerrier et V. Munier (dir.), *Épistémologie et didactique : synthèses et études de cas en mathématiques et en sciences expérimentales* (pp. 95-111). Besançon : Presses universitaires de Franche-Comté.
- MUNIER, V. ET AL. (2021). Étude didactique de l'impact d'un dispositif de formation continue à un enseignement des sciences fondé sur l'investigation. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 23, 109-136.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996). *National science education standards*. Washington: National Academy Press.
- ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES (OCDE). (1999). *Measuring Students Knowledge and Skills*. OECD Program for International Student Assessment (PISA). Paris : OCDE.
- OUVRIER-BUFFET, C. (2007). *Des définitions pour quoi faire?* Fabert : France.

- PAPERT, S. (1980). *Mindstorms*. Basic Books: NY.
- PAPERT, S. (1993). *The children's machine*. Basic books: NY.
- PASTRE P. (2007). Quelques réflexions sur l'organisation de l'activité enseignante. *Recherche et formation*, 56, 81-93.
- PERRIN-GLORIAN, M-J. (2019) L'ingénierie didactique à l'interface de la recherche avec l'enseignement. Dans C. Margolinas (dir.). *En amont et en aval des ingénieries didactiques* (pp. 57-78), La pensée sauvage.
- POLYA, G. (1957). *How to solve it* (2<sup>e</sup> ed.). New York, NY: Doubleday.
- PROULX, J. (2011). L'enseignant et ses mathématiques : Repenser les pratiques de formation des enseignants en fonction des mathématiques vécues au quotidien de la classe. *Actes du colloque de la COPIRELEM* (pp. 33-54). IREM de Dijon : France.
- PROULX, J. (2012). De l'existence de mathématiques de la didactique : Réflexions sur l'articulation entre mathématique et didactique. *Actes du colloque Espace Mathématique Francophone EMF-2012*. Genève, Suisse : EMF.
- PROULX, J. (2017). Essai critique sur les travaux de John Hattie pour l'enseignement des mathématiques : une entrée par la didactique des mathématiques. *Chroniques – fondements et épistémologie de l'activité mathématique*.
- PROULX, J. (2019a). Recherches et résolution de problèmes en enseignement des mathématiques : éducation, mathematics education et didactique des mathématiques. *Chroniques – fondements et épistémologie de l'activité mathématique*.
- PROULX, J. (2019b). Faire vivre une formation à l'enseignement des mathématiques par résolution de problèmes. *Revue canadienne de l'enseignement des sciences, des mathématiques et des technologies*, 19(2), 120-142.
- PROULX, J. (2019c). Les données probantes et un point de vue de didactique des mathématiques. *Chroniques – fondements et épistémologie de l'activité mathématique*.
- PROULX J. (2023). Making mathematics talk: toward a research program on school mathematics. *For the Learning of Mathematics, Monograph #2*, 9-15.
- PROULX, J., & GATTUSO, L. (Eds.). (2010). *Formation des enseignants en mathématiques : Tendances et perspectives actuelles*. Sherbrooke, Qc : CRP.
- REID, D., & KNIPPING, C. (2010). *Proofs in mathematics education: research, teaching and learning*. Sense Publishers.

- ROBARDET, G. (2001) Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? Notion de situation-problème, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 836, 1173-1190.
- ROBERT, A. & ROGALSKI, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : Une double approche. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(4), 505-528.
- ROBERT, A. & VIVIER, L. (2013). Analyser des vidéos sur les pratiques des enseignants du 2<sup>nd</sup> degré en mathématiques, *Éducation et didactique*, 7(2), 115-144.
- SALIN, M. H., & BROUSSEAU, G. (1980). *Qu'est-ce qui est caché dans la boîte?* [VHS/noir et blanc/44 mins.] IREM : Bordeaux, France.
- SCHOENFELD, A. (1992). Learning to think mathematically: Problem solving, metacognition, and sense-making in mathematics. In D. Grouws (Ed.), *Handbook for research on mathematics teaching and learning* (pp. 334-370). New York: Macmillan.
- SCHÖN, D.A. (1993). *Le praticien réflexif. À la recherche du savoir caché dans l'agir professionnel*. Montréal: Éditions Logiques.
- SENSEVY, G., FOREST, D., QUILIO, S., & MORALES, G. (2013) Cooperative engineering as a specific design based research. *ZDM Mathematics Education*, 45(7), 1031-1043.
- SHULMAN, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
- SIERPINSKA, A. (2004). *Theory is not necessary. Practice of theory is. On the necessity of practical understanding of theory*. Conférence prononcée à ICME-10, Copenhague, Danemark.
- TIBERGHIE, A. & VINCE, J. (2005). Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, 10, 153-176.
- STEFFE, L. (2017). Interview 1708. *Samuel Otten Math ed podcast*. [www.podomatic.com/podcasts/mathed/episodes/2017-08-10T07\\_37\\_26-07\\_00](http://www.podomatic.com/podcasts/mathed/episodes/2017-08-10T07_37_26-07_00)
- TEMPIER, F., LAJOIE, C. & CELI, V. (Eds.) (2022). Les pratiques de formation à l'enseignement des mathématiques. Une approche par la recherche en didactique. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, numéro thématique 1. <https://doi.org/10.4000/adsc.1553>
- VEILLARD L., TIBERGHIE A. & VINCE J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la



formation des professeurs. Le rôle de théories ou outils spécifiques. *Activités*, 8(2), 202-227.

VENTURINI P., & TIBERGHEN A. (2012). La démarche d'investigation dans le cadre des nouveaux programmes de sciences physiques et chimiques : étude de cas au collège. *Revue française de pédagogie*, 180, 95-120.

VOIGT, J. (1985). Patterns and routines in classrooms interaction. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, 6(1), 69-118.

WATERS-ADAMS, S. (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.

WALLISER, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris : Seuil.

ZASLAVSKY, O., CHAPMAN, O., & LEIKIN, R. (2003). Professional development of mathematics educators: Trends and tasks. In A. J. Bishop, M.A. Clements, C. Keitel, J. Kilpatrick, & F. K. S. Leung (Eds.), *Second international handbook of mathematics education* (Vol. 2, pp. 877-917). Great Britain: Kluwer.

**VALERIE MUNIER**

Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique, Éducation et Formation

Université de Montpellier et Université Paul Valéry Montpellier 3

valerie.munier@umontpellier.fr

**JEROME PROULX**

Laboratoire Épistémologie et Activité Mathématique

Université du Québec à Montréal

proulx.jerome@uqam.ca