
FORMER À L'ENSEIGNEMENT DE LA MODÉLISATION EN PHYSIQUE-CHIMIE - ÉTUDE EXPLORATOIRE D'UNE FORMATION FONDÉE SUR UN DISPOSITIF *LESSON STUDIES* INITIÉ EN MATHÉMATIQUES

Alice DI FABIO¹

IREMS de Paris

Estelle TISON²

IREMS de Paris

Sandra JAVOY³

IREMS de Paris

Sonia YVAIN-PRÉBISKI⁴

IREM de Lyon

Blandine MASSELIN⁵

IREM de Rouen

Résumé. En France et à l'international, dès l'école élémentaire, la résolution de problèmes et la pratique d'activités de modélisation sont au cœur des apprentissages des élèves en mathématiques et en physique-chimie. Cependant, appréhender la modélisation en tant que telle et la prendre en compte comme enjeu d'enseignement reste difficile pour les enseignants et nécessite donc une formation spécifique. En mathématiques, le dispositif *Lesson Studies* adaptées (LSa) pour la formation continue peut permettre une meilleure appropriation de cette démarche par les enseignants. En physique-chimie, dans le cadre d'un groupe IREMS rassemblant des chercheuses en didactique et des enseignants du secondaire, une « boucle de LS » a été mise en œuvre en 2023-2024. Dans cet article, nous définissons la notion de modélisation en physique-chimie, puis nous proposons une analyse didactique du germe de situation travaillé par le collectif lors de cette boucle, qui met en jeu le concept de masse volumique. Nous présentons ensuite l'analyse des échanges entre les enseignants du collectif lors du début de la formation. Les résultats de notre analyse montrent que l'activité de modélisation est à l'œuvre de façon implicite uniquement. Ces constats permettent d'ouvrir des perspectives à un travail de recherche plus large et pluridisciplinaire (regards croisés mathématiques/physique-chimie). En particulier, certaines difficultés liées à l'identification des enjeux de la modélisation semblent communes aux enseignants de mathématiques et aux enseignants de physique-chimie.

Mots-clés. Lesson Study, physique-chimie, modélisation, formation continue, masse volumique.

¹ alice.di-fabio@u-paris.fr

² estelle.tison@univ-rouen.fr

³ sandra.javoy@univ-orleans.fr

⁴ sonia.yvain@univ-lyon1.fr

⁵ blandine-lucie.masselin@ac-normandie.fr

Introduction et contexte

En France, dès le cycle 2, le travail de modélisation prend une place de plus en plus importante dans les programmes de mathématiques en France comme à l'international. Dès l'école primaire, les enseignants sont invités à proposer des situations réelles ou tout au moins ancrées dans une certaine réalité. En mathématiques, de telles situations nécessitent au préalable d'être rendues accessibles par un traitement mathématique, ce qui amène les élèves à mettre en œuvre une démarche différente de celle rencontrée dans la résolution de problèmes intra-mathématiques. En physique-chimie, de telles situations, impliquant le plus souvent une dimension expérimentale, amènent les élèves à articuler le monde des objets, des expériences, des faits et celui des modèles et des théories. Plusieurs études en didactique des mathématiques (Barquero et al., 2019 ; Wozniak, 2012 ; Hankeln et Hersant, 2020) comme en didactique de la physique (Morge et Doly, 2013 ; Péliissier et Venturini, 2016) et en didactique de la chimie (Bouard et al., 2022) font état de difficultés des ensei-

gnants à mettre en œuvre de telles démarches de modélisation et concluent sur la nécessité de former spécifiquement les enseignants à la modélisation (Di Fabio et al., 2025). En mathématiques, le dispositif *Lesson Studies* adaptées (Masselin, 2020) utilisé dans le cadre de la formation continue semble permettre une meilleure appropriation de cette démarche par les enseignants (Yvain-Prébiski, 2023). Ce dispositif a été élaboré en 2016 par des formateurs de l'IREM de Rouen. Ils ont adapté un dispositif originaire du Japon et développé entre autres en Suisse par Clivaz (2015), les *Lesson Studies* (LS), pour la formation d'enseignants de mathématiques. La dynamique principalement ascendante des LS adaptées (LSa) est originale dans un contexte français de formation qui reste très hiérarchisé (Artigue et Masselin, 2024). Il s'agit d'une formation de longue durée (comparativement aux formations habituelles précitées), dont le déroulement est cyclique et se fait sous forme de « boucles de LS » (*cf.* figure 1) qui ont lieu sur trois journées (notées J1, J2 et J3, décrites plus en détails par la suite).

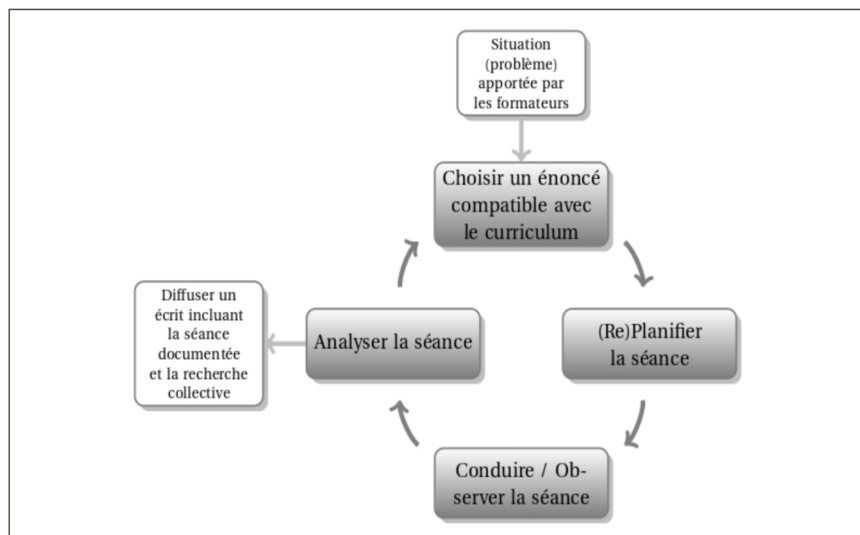


Figure 1 : Boucle de LS mise en œuvre, issue du processus de LSa (Masselin, 2020, p. 30).

Ce type de dispositif a donné lieu à de nombreuses études didactiques, qui mettent en évidence des apports pour tous les acteurs qui y prennent part, notamment par sa dimension collaborative entre enseignants, chercheurs et praticiens (Takahashi et McDougal, 2016 ; Lewis et Perry, 2014 ; Clerc-Georgy et Clivaz, 2016 ; Masselin et Hartmann, 2020). En particulier, il permet un travail sur l'activité de modélisation (Yvain-Prébiski et Masselin, 2023 ; Masselin et Artigue, 2023).

Nous (A. Di Fabio, E. Tison et S. Javoy, trois des autrices de cet article et chercheuses en didactique de la physique et de la chimie) nous sommes appuyées sur ces résultats pour créer en 2023 un groupe « LS en sciences » au sein de l'IREMS de Paris⁶ avec l'objectif d'accompagner le développement professionnel d'enseignants de physique-chimie de collège et de lycée, sur la modélisation, par le biais des LSa. Pour lancer le travail du groupe, l'ensemble des membres a accepté de participer à une boucle de LSa dans laquelle les trois chercheuses ont joué le rôle de facilitatrices (nom donné aux formatrices dans le dispositif LSa). Cette boucle s'est déroulée au cours de l'année scolaire 2023-2024 et a été élaborée conformément au vademecum du dispositif LSa (Masselin, 2020, p. 21). Lors de la première journée (J1), qui a eu lieu en octobre 2023, le collectif d'enseignants a découvert la situation apportée par les facilitatrices, se l'est appropriée, en a effectué une analyse *a priori* et a construit une séance d'enseignement à partir de cette situation. La deuxième journée, qui a eu lieu en janvier 2024 dans un collège, a permis la mise en œuvre, l'observation et l'analyse de la séance dans une classe de 3^e qui n'était la classe d'aucun des membres du groupe. Enfin, au cours de la troisième journée, qui a eu lieu en avril 2024, le collectif a partagé les retours d'expérience après la mise en œuvre de la

séance par certains enseignants dans leur(s) classe(s). Les facilitatrices ont ensuite présenté des apports didactiques, avant la rédaction, par le collectif, d'un cahier de LSa.

Dans cet article, nous précisons d'abord ce que nous entendons par modélisation en physique-chimie, puis nous présentons une analyse du contenu des échanges qui ont eu lieu lors de J1 qui permet, en particulier, de mettre en évidence des éléments éclairant la manière dont un collectif d'enseignants de physique-chimie appréhende la modélisation. À plus long terme, nous visons à croiser cette analyse avec les résultats obtenus précédemment par Yvain-Prébiski et Masselin (2023) en mathématiques dans l'objectif de comparer les enjeux de formation sur la modélisation des enseignants de physique-chimie et de mathématiques. Les premiers jalons théoriques de cette perspective sont présentés en dernière section.

1. – Qu'est-ce que la modélisation en physique-chimie ?

1.1. - De la réalité immédiate à la réalité construite

Appréhender une situation de la vie courante et quotidienne, et lui donner un sens physique, correspond à une tâche très répandue dans le cadre scolaire. Plus largement, la confrontation au réel est inhérente à la pratique scientifique dont le but est de rendre intelligibles les lois de la nature. Nous rejoignons le propos de Koponen (2007, p. 753, notre traduction) lorsqu'il souligne « *qu'il est essentiel pour les enseignants de comprendre comment la réalité est abordée en physique* » ou en chimie. Or la notion de réalité recouvre une variété de significations. De prime abord et de manière intuitive, il apparaît que la réalité est accessible par l'observation attentive et minu-

⁶ <https://irems.u-paris.fr/groupe-ls-en-sciences/>

tieuse du monde qui nous entoure : pour saisir des « parties de la réalité » (Morge et Doly, 2013, p. 157), il est possible de s'appuyer sur la perception immédiate. Or, en présentant comme « le premier obstacle » ce qu'il appelle « l'expérience première », c'est-à-dire cette perception immédiate, Bachelard (1938, p. 23) met en garde contre la pensée spontanée empreinte de certitudes et de subjectivité. Il suggère de rompre avec le réalisme naïf qui s'oppose à ce qu'il nomme « l'esprit scientifique » (dans Morge et Doly, 2013, p. 161). Il convient donc de distinguer la représentation naïve de la réalité, « immédiate et intuitive » (Morge et Doly, 2013, p. 156) et la « réalité scientifique » (Soler, 2013, p. 193), qui « s'identifie à la description du monde que proposent les sciences d'une époque » (*ibid.*, p. 194).

Afin de caractériser la réalité scientifique, au-delà de sa distinction avec la réalité immédiate, il faut l'envisager à la fois dans le champ empirique et dans le champ théorique (Walliser, 1977 ; Robardet et Guillaud, 1997). En effet, les lois et les théories portent sur la réalité scientifique empirique qui est rendue observable par l'expérimentation (Morge et Doly, 2013) : Martinand et al. (1992, p. 15) parlent de « référent empirique » ; Koponen (2007, p. 757, notre traduction) évoque « la réalité accessible par le biais d'expériences ». Dans leur analyse du savoir en chimie, Kermen et Méheut (2011) dissocient, au sein du « niveau expérimental », la « réalité idéalisée » et la « réalité perçue ». Finalement, la réalité scientifique, qui n'est donc pas la réalité du sens commun, n'est pas donnée directement, elle est le produit d'une construction. Il est ici question du « rapport entre les phénomènes de la réalité et ce qui en est dit dans le discours scientifique, entre le « réel » et le « construit » » (Drouin, 1988, p. 5). Cet aspect « construit » est évoqué par Soler (2013, p. 177), pour qui « le rapport entre construc-

tions scientifiques (modèles, théories, etc.) et « réalité » visée par ces constructions » constitue une difficulté pour les élèves. Pour mieux cerner cette difficulté, nous présentons la notion de modèle, puis nous proposons une description de l'activité de modélisation dans un contexte d'enseignement de physique-chimie.

1.2. - Le modèle et ses fonctions

Morge et Doly (2013, p. 157) expliquent le but unificateur de la science, qui produit des connaissances sur les théories et les lois ainsi que « les éléments de réalité empirique qu'elles recouvrent ». Ils en déduisent que le modèle permet de : « reproduire, en la formalisant de manière plus ou moins abstraite selon les besoins, mais en la simplifiant et en la localisant, une réalité scientifique » (*ibid.*). Dans la même lignée, Kermen (2018, p. 23) parle des modèles comme « des structures matérielles ou formelles d'un domaine circonscrit de la réalité pour représenter de façon simplifiée [...] cette réalité ». L'un des enjeux didactiques de l'enseignement de la notion de modèle, souligné par Morge et Doly (2013), est de mettre en évidence la distinction entre le modèle et la réalité qu'il modélise.

À l'instar de Soler (2013, p. 185), nous considérons que le rôle d'un modèle est de « résoudre des problèmes particuliers », ses fonctions étant de décrire des parties de réalité et d'expliquer et prévoir des phénomènes (Robardet et Guillaud, 1997).

1.3. - La modélisation, activité centrale en physique-chimie

Pour Tiberghien et Vince (2005, p. 4), du point de vue épistémologique, le fonctionnement de la physique est fondé sur « la modélisation du monde matériel inanimé ». En appui de ces propos, ils distinguent « deux mondes : celui des objets et événements qui réfère au

monde matériel inanimé, et celui des théories et modèles qui réfère aux aspects théoriques et aux modèles des situations matérielles étudiées » (ibid.) (cf. figure 2).

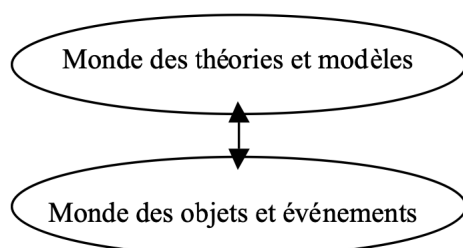


Figure 2 : Les deux mondes (Tiberghien et Vince, 2005, p. 4).

Se fondant sur l'idée qu'une difficulté majeure des élèves est d'établir des correspondances entre le niveau des concepts (ou théorique) et le niveau expérimental, Tiberghien et Vince (2005) considèrent que l'activité de modélisation, caractérisée par la mise en relation d'éléments de chacun des deux mondes, peut mobiliser à la fois des concepts de la vie quotidienne et des concepts de la physique, ce qui les amène à formaliser la distinction, pour chacun des deux mondes, entre ces deux domaines (cf. figure 3). Ils posent ainsi les bases de la théorie des deux mondes, qui « offre une description théorisée de l'activité d'enseignement de la modélisation en physique » (de Hosson & Elias, 2021, p. 11).

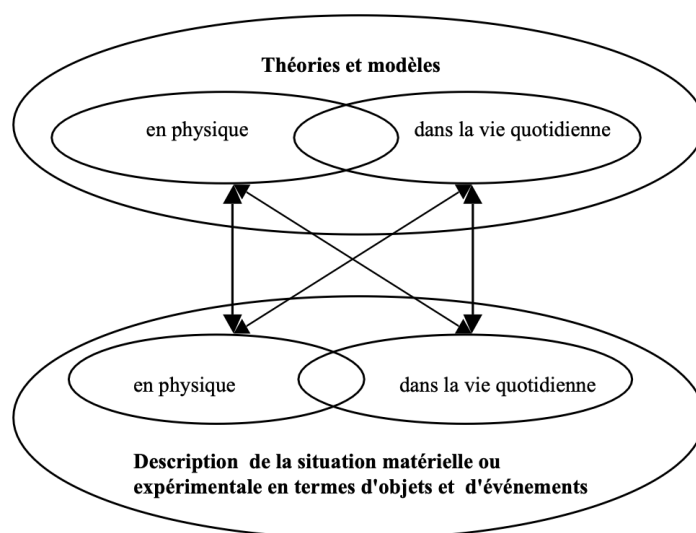


Figure 3 : Les types de savoir à partir de l'analyse en termes de modélisation (Tiberghien et Vince, 2005, p. 6).

Cet éclairage théorique nous permet de souligner que l'activité de modélisation en physique et en chimie ne peut pas être réduite à l'utilisation de modèles prédéfinis tels que le modèle de la réaction chimique en chimie, le modèle du rayon lumineux en optique, le modèle du gaz parfait en thermodynamique, etc.

2. – Analyse didactique de la situation proposée

2.1. - Présentation du germe de situation et de ses potentialités

La LSa analysée est basée sur un germe de situation proposé aux enseignants par les facilitatrices (cf. figure 4). Masselin et Artigue (2023) définissent un germe de situation

comme le texte d'un problème ouvert où un travail important doit être fait pour le transformer en situation d'enseignement. L'énoncé du

problème lui-même peut être adapté en fonction du contexte, d'où le nom de « germe de situation ».

Zélie a faim, elle veut faire des œufs durs. Elle prépare une casserole d'eau salée et y plonge les œufs que sa maman Estelle vient de ramasser dans le poulailler. Les œufs remontent à la surface de l'eau. Elle se rappelle alors d'un dicton de sa grand-mère : si les œufs remontent à la surface de l'eau, c'est qu'ils ne sont pas frais ! Zélie n'y comprend plus rien : ils sont frais mais ils remontent à la surface de l'eau donc ils ne sont pas frais !

Figure 4 : Germe de situation.

Nous justifions le choix de ce germe par ses potentialités en termes d'activité de modélisation, par le fait qu'il mobilise le concept de masse volumique, mis en relation avec le comportement d'un solide immergé dans un liquide, et par ses potentialités en termes de méthodes de résolution (expérimentale ou non et avec ou sans réalisation de mesures quantitatives). Dans la suite, nous argumentons les raisons de ce choix.

2.2. - Potentialités du germe en termes d'activité de modélisation

La situation proposée porte sur la différence de comportement d'un œuf frais selon qu'il est immergé dans de l'eau salée ou non salée ; elle s'ancre donc dans la vie quotidienne. Cette situation renvoie au comportement d'un objet solide immergé dans un liquide, que l'on peut modéliser en comparant la masse volumique de l'objet et celle du liquide.

Les œufs remontent à la surface de l'eau car c'est de l'eau salée que Zélie a dans sa casserole. Si les élèves partent de cette hypothèse, une première activité de modélisation peut simplement consister à vérifier cela par l'expérience, mais en remplaçant la casserole par un cristalliseur ou un bécher (passage du domaine de la vie quotidienne à celui de la physique) et en remarquant que le comportement décrit dans la situation n'est possible qu'à la condi-

tion d'avoir une eau suffisamment salée (la prise en compte de la concentration massique en sel de l'eau salée relevant du monde des théories et des modèles, d'où un aller-retour entre les deux mondes). Ces deux activités ne conduisent cependant pas à l'élaboration d'un modèle tel qu'évoqué précédemment, qui permet d'*expliquer* scientifiquement la situation (une des fonctions d'un modèle) puis de *prévoir* le comportement de n'importe quel solide dans n'importe quel liquide (autre fonction d'un modèle).

En s'appuyant sur le cadre conceptuel de la « *théorie des deux mondes* » (Tiberghien et Vince, 2005), nous proposons une analyse du contenu du germe et des éléments nécessaires à sa résolution.

Nous situons dans le monde des objets et des événements :

- l'observation du fait que les œufs remontent à la surface de l'eau (domaine de la vie quotidienne) ;
- l'observation de la position d'un solide immergé dans un liquide — à la surface ou au fond du liquide (domaine de la physique).

Dans le monde des théories et des modèles, nous situons :

- le dicton de la grand-mère (domaine de la vie quotidienne) ;
- la notion de masse volumique et/ou celle de poussée d'Archimède (domaine de la physique) ;

- la comparaison de masses volumiques.

La figure 5 représente les éléments ainsi analysés, placés dans les deux mondes et les deux domaines.

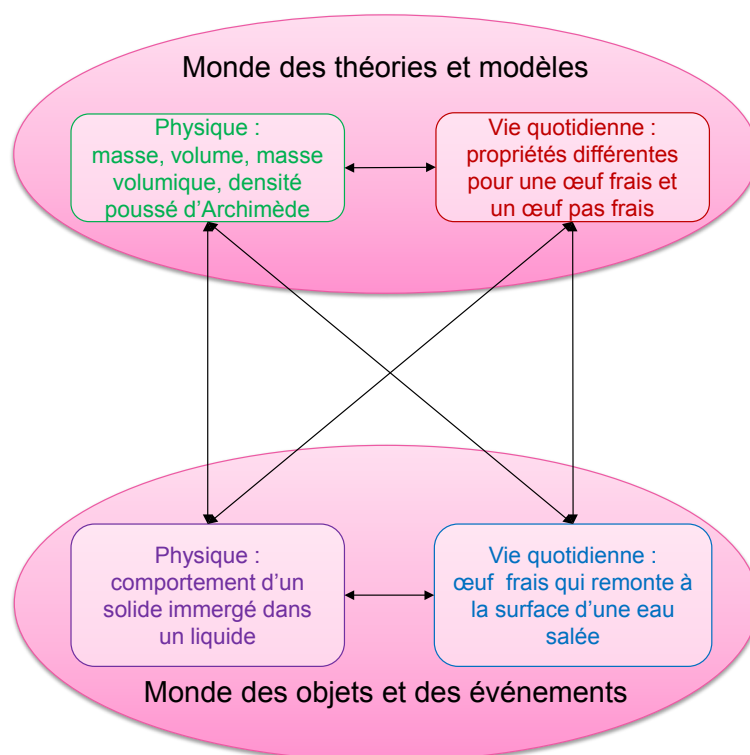


Figure 5 : Schéma de l'analyse de la situation dans la théorie des deux mondes.

La mobilisation de grandeurs physiques du monde des théories et modèles est nécessaire, et résoudre le germe de situation nécessite l'établissement de liens entre le monde des objets et événements et celui des théories et des modèles, mais aussi entre le domaine de la vie quotidienne et celui de la physique. Finalement, le cheminement que l'on peut envisager, en partant de la situation concrète, aboutit à l'objectif d'apprentissage suivant, qui appartient au domaine de la physique : associer le comportement d'un solide immergé dans un liquide à la comparaison de sa masse volumique à celle du liquide (si la masse volumique du solide est supérieure à celle du liquide, il ira au

fond du liquide, dans le cas contraire, il remontera à la surface du liquide).

2.3. - La masse volumique : analyse épistémologique, institutionnelle et didactique

La masse volumique, de symbole ρ , d'un corps homogène est une grandeur quotient caractéristique de ce corps, dans un état physique et à une température donnés, qui rend compte de la masse de ce corps pour un volume donné. La masse volumique d'un corps homogène rend ainsi compte de la proportionnalité entre la masse du corps et son volume selon la relation : $m = \rho \times V$. Elle peut être déterminée en mesurant la masse d'un échantillon de ce corps

de volume donné (choisi) ou par la mesure du volume d'un échantillon de ce corps pour une masse donnée (choisie). Pour un corps hétérogène (i.e. non pur et de composition spatiale variable, comme un œuf), la détermination de sa masse volumique passe par la détermination de la masse et du volume de l'intégralité du corps. La détermination de la masse volumique de différents corps permet de les identifier (par comparaison avec des valeurs de référence) ou de les différencier (par simple comparaison de leurs valeurs). La comparaison de la masse volumique de différents corps peut aussi être réalisée en dehors de leur valeur numérique, par comparaison de leur masse à volume identique (ou de leur volume à masse identique). Leur comparaison permet, dans le cas de différents liquides, de prévoir l'ordre de superposition des liquides lorsqu'ils sont introduits dans un même récipient (le plus dense — i.e. de masse volumique la plus grande — se trouvera en dessous du moins dense — i.e. de masse volumique la plus faible — et, dans le cas de l'immersion d'un solide dans un liquide, de prévoir le comportement du solide (s'il est moins dense que le liquide, il remonte à la surface du liquide, dans le cas contraire, il descend au fond du récipient contenant le liquide). Inversement, le positionnement d'un liquide par rapport à un autre ou le comportement d'un solide immergé dans un liquide permet de classer les corps selon leur masse volumique. La masse volumique appartient donc à un réseau conceptuel complexe comprenant notamment les concepts de masse et de volume, et son enseignement-apprentissage nécessite une bonne compréhension préalable des sens physiques des grandeurs « masse » et « volume » (Piaget et Inhelder, 1941 ; Hashweh, 2016).

En France, la masse volumique est mentionnée dans les textes officiels du cycle 3 (MEN, 2023) comme suit : « *Les mesures de masse et de volume, puis l'exploitation de la*

relation de proportionnalité entre la masse et le volume d'un même corps homogène, préparent l'introduction du concept de masse volumique au cycle 4 », où il est attendu la mise « *en œuvre d'un protocole expérimental pour déterminer une masse volumique d'un liquide ou d'un solide* » et l'exploitation « *des mesures de masse volumique pour différencier des espèces chimiques* » (MENJS, 2020). En seconde (MENJ, 2019), il s'agit de « *déterminer la masse volumique d'un échantillon [...] pour identifier une espèce chimique et, le cas échéant, qualifier l'échantillon de mélange* » en la comparant notamment à des « *valeurs de référence* » ; la valeur de la masse volumique de l'eau liquide et sa comparaison à celles d'autres corps purs et mélanges sont en particulier mentionnées.

C'est donc une approche mathématique de la grandeur, par l'application de la relation : $m = \rho \times V$, qui semble être privilégiée au niveau institutionnel, même si une approche qualitative par la comparaison « *de masses de corps différents, mais de même volume, et réciproquement* » est citée en 6^e (MEN, 2023) dans le but de « *mettre en évidence expérimentalement un critère pour prévoir la position respective de deux couches liquides* ».

D'après Dawkins et al. (2008), la « *mathématisation* » précoce de certaines grandeurs, par l'application de relations mathématiques, peut détourner les élèves de leur sens physique et faire écran à leur conceptualisation. Concernant la masse volumique, cela ne leur permet pas de prévoir correctement le comportement d'objets immergés dans un liquide que les élèves semblent majoritairement associer à la masse, au volume ou à la forme de l'objet (Javoy et al., 2018). Akatugba et Wallace (1999) montrent aussi qu'une fois que des relations reliant des grandeurs physiques ont été introduites, les élèves ont tendance à privilégier l'utilisation de ces relations plutôt

que des raisonnements de proportionnalité. Une approche dans un premier temps par des activités de comparaisons en dehors de toute mesure quantitative est finalement suggérée tant par des travaux de recherche en psychologie qu'en didactique (Molvinger et al., 2017).

Outre les potentialités didactiques d'un travail autour de la masse volumique, la proposition d'un germe mobilisant le concept de masse volumique laisse une grande liberté de choix aux enseignants, dans la mesure où il peut être traité de la sixième à la seconde, voire au-delà (la masse volumique est alors considérée comme un acquis susceptible d'être mobilisé, par exemple en mécanique, *via* la poussée d'Archimède).

2.4. - Potentialités du germe en termes de méthodes de résolution

Dans le cadre d'une activité de modélisation qui viserait à étudier les raisons théoriques du comportement d'un solide immergé dans un liquide (fonction explicative d'un modèle) et permettant par la suite de prévoir ce comportement pour n'importe quel solide dans n'importe quel liquide (fonction prédictive d'un modèle), plusieurs méthodes de résolution sont possibles. Elles conduisent à différentes tâches pour les élèves. Les grandeurs physiques masse, volume et/ou masse volumique, nécessaires à la résolution du germe, peuvent être :

- soit fournies par l'enseignant, et il s'agit alors de comparer des valeurs numériques (fournies ou calculées à partir de données fournies) et de relier cette comparaison au comportement d'un solide immergé dans un liquide (démarches sans expérience) ;
- soit déterminées à partir de mesures obtenues expérimentalement et de formules de calcul d'une masse volumique (démarches avec expérience, mesures quantitatives et calculs).

Une démarche intermédiaire consisterait, à partir de quelques données fournies (par exemple la valeur de la masse volumique de différents liquides), à déterminer, grâce à des mesures obtenues expérimentalement, d'autres grandeurs (par exemple la masse volumique de différents solides), avant de les comparer et mettre en lien cette comparaison avec le comportement des solides dans les liquides.

Une autre démarche, *via* des activités expérimentales en dehors de toute mesure quantitative, peut également être mise en œuvre : la comparaison, à l'aide d'une balance de Roberval, de la masse de différents solides par rapport à celles d'un même volume de différents liquides (démarche avec expérience sans mesure quantitative⁷ ni calculs) comme le montre la figure 6.

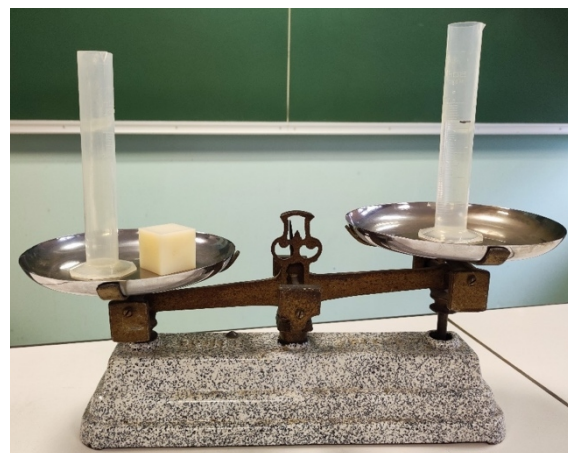


Figure 6 : Comparaison de la masse d'un solide en nylon à celle d'un même volume d'eau à l'aide d'une balance de Roberval.

⁷ L'utilisation d'un vase à débordement permet d'obtenir un volume de liquide équivalent à celui d'un solide totalement immergé dans le liquide sans avoir à mesurer quantitativement ce volume ; il suffit de relever le niveau de liquide (sortant du vase à débordement) recueilli dans un récipient transparent.

FORMER À L'ENSEIGNEMENT DE LA MODÉLISATION EN PHYSIQUE-CHIMIE - ÉTUDE EXPLORATOIRE D'UNE FORMATION FONDÉE SUR UN DISPOSITIF LESSON STUDIES INITIÉ EN MATHÉMATIQUES

3. – Méthode de recueil et d'analyse des données

3.1. - Données recueillies

Comme indiqué précédemment, nous avons proposé aux enseignants un germe qui présente des potentialités larges en termes d'activité de modélisation. Lors de J1, les enseignants commencent par résoudre le germe à partir de la consigne suivante :

Dans un premier temps, vous vous appropriez le germe. Comment feriez-vous pour répondre à la question ?

Ils doivent ensuite proposer une analyse *a priori* de ce germe avec la consigne de remplir la « grille d'amorce d'analyse *a priori* » (items du tableau 2 ci-après) qui leur est distribuée.

Nous avons enregistré l'ensemble des échanges ayant eu lieu lors des phases collectives (enregistrement audio et vidéo) et recueilli les annotations effectuées sur les feuilles individuelles ; les données relevées sont présentées dans le tableau 1.

Étape	Modalité	Durée	Document support	Corpus de données
Résolution du germe de situation	Individuellement	10 à 15 min	Germe de situation	Annotations individuelles des enseignants
	Collectivement	10 à 15 min		Transcriptions de la discussion collective
Analyse <i>a priori</i> du germe de situation	En sous-groupe	25 à 30 min	Grille d'amorce d'analyse <i>a priori</i>	Transcriptions des discussions des trois sous-groupes
	Collectivement	1 h		Transcription de la discussion collective

Tableau 1 : Déroulé de la matinée de J1 et corpus de données.

L'analyse *a priori* a été effectuée par le collectif en appui sur la « grille d'amorce d'analyse *a priori* » dont les items sont rassemblés dans le tableau 2. Ces items ont été

adaptés par les facilitatrices à partir de ceux proposés par Masselin (2020, p. 37) en mathématiques pour être en adéquation avec la physique-chimie.

Connaissances et/ou compétences visées	Place dans le programme	Prérequis	Dimension modélisation
Réactions et réponses attendues des élèves	Difficultés prévisibles pour les élèves	Expériences possibles, protocole, observations et conclusions	Difficultés concernant la mise en œuvre en classe (pour l'enseignant)

Tableau 2 : Items de la grille d'amorce d'analyse *a priori*.

Les items « expériences possibles, protocole, observations et conclusion » et « dimension modélisation » ont été ajoutés, en cohérence avec les spécificités de la physique-chimie : le caractère expérimental et la place de la

modélisation, deux aspects inhérents à ces disciplines expérimentales.

3.2. - Méthode d'analyse des données et hypothèses

À partir des échanges et des annotations individuelles, nous repérons ce que les enseignants identifient comme savoirs mobilisés (masse, volume, masse volumique, poussée d'Archimède, concentration massique, etc.) La démarche de résolution qu'ils envisagent peut inclure ou non une ou des expériences, qui peuvent se faire avec ou sans mesures quantitatives et éventuellement des calculs. Nous souhaitons également examiner quelle place est donnée à une activité de modélisation. Nous caractérisons et décrivons les activités de modélisation mises en œuvre par les enseignants (lors de la phase de résolution) et celles qu'ils attendent des élèves (lors de la phase d'analyse *a priori*).

En appui sur Yvain-Prébiski et Chesnais (2019), nous envisageons la possibilité que les enseignants mobilisent une démarche de modélisation qui reste implicite (hypothèse 1). En effet, dans ces travaux, les autrices étudient les contraintes et les conditions des pratiques d'enseignement concernant la modélisation mathématique dans l'enseignement secondaire. Leurs résultats montrent que les enseignants proposent aux élèves des activités de modélisation sans considérer la modélisation comme un enjeu d'apprentissage. Une des raisons évoquées est leur difficulté à caractériser eux-mêmes ce qu'est une démarche de modélisation. Nous cherchons donc aussi à repérer des indices de la mise en œuvre d'une telle démarche sans qu'elle soit identifiée comme telle. Pour la résolution du germe de situation, si les enseignants proposent une démarche expérimentale, l'utilisation du matériel de travaux pratiques (le bécher ou le cristalliseur remplaçant la casserole de Zélie) implique un passage effectif du domaine du quotidien au domaine de la physique (dans le monde des objets et des événements). Par ailleurs, s'ils

suggèrent de manipuler un œuf, la situation reste locale et contextualisée, mais s'ils suggèrent de manipuler un objet solide remplaçant l'œuf, la situation est alors décontextualisée. Enfin, dans l'analyse *a priori* qu'ils font du germe de situation, selon les objectifs d'apprentissage potentiellement retenus, les enseignants peuvent envisager une généralisation des observations expérimentales vers les connaissances suivantes : « si la masse volumique d'un solide immergé dans un liquide est supérieure (resp. inférieure) à celle du liquide, le solide tombe au fond (resp. remonte à la surface) du liquide ». Ces connaissances sont situées dans le monde des théories et des modèles. Dans ce mouvement de décontextualisation et/ou de généralisation, nous identifions des liens entre les deux mondes : une activité de modélisation est donc à l'œuvre. Or il est possible que les enseignants ne perçoivent pas ces liens (hypothèse 2), notamment s'ils donnent au terme « modélisation » le sens restreint d'utilisation de modèles prédéfinis et spécifiques d'un domaine précis.

4. – Résultats

Les résultats de notre analyse montrent que les enseignants privilégient une approche expérimentale, avec des prises de mesures quantitatives de masses et de volumes afin de déterminer les différentes masses volumiques en appliquant la relation mathématique reliant masse, volume et masse volumique. Ces approches et stratégies sont celles préconisées dans les programmes. Nous constatons par ailleurs une méconnaissance de la part des enseignants de certaines difficultés des élèves notamment par rapport au sens physique des grandeurs masse, volume et masse volumique, dont ils ne discutent pas.

Les enseignants ne proposent pas de remplacer l'œuf par un solide ayant le même com-

portement dans l'eau pure et dans l'eau salée (donc, de masse volumique proche de celle d'un œuf) ; ils restent essentiellement dans le domaine de la vie quotidienne.

Aucune activité de modélisation n'est proposée explicitement par les enseignants, bien que le lien entre le comportement de l'œuf dans l'eau et l'eau salée et la grandeur masse volumique soit central et incontournable dans les échanges : dans l'analyse que les enseignants font de la situation proposée, le lien entre le monde des objets et événements de la vie quotidienne et celui des théories et modèles de la physique reste implicite.

Parallèlement à ce constat, il apparaît que les enseignants ne semblent pas percevoir de lien entre la situation proposée et la modélisation comme en témoignent les extraits suivants issus des discussions dans chacun des sous-groupes et dans la discussion collective concernant la question de la dimension « modélisation » dans la grille d'analyse : « Est-ce que c'est très clair dans nos têtes la modélisation ? » (Discussion du sous-groupe G1) ; « Là, par rapport à ça [la situation proposée] j'ai du mal. Qu'est-ce qu'on modélise ? » (Discussion du sous-groupe G2) ; « La modélisation, moi, je ne la vois pas, là. » (Discussion du sous-groupe G3) ; « La dimension modélisation... Bon ben on essayera peut-être de se faire aider hein ! » (Discussion dans le sous-groupe GD) ; « Justement, c'est une question que je me pose. Quelle est la dimension de modélisation là-dedans ? » (Discussion en groupe entier).

Au fil des échanges, quand ils s'interrogent sur la modélisation, les enseignants l'associent à des contenus de savoir spécifiques tels que « modélisation microscopique corps pur et mélange » (évoquée dans le sous-groupe G1) ou la notion de force comme l'indique une enseignante du sous-groupe G3 :

« La dimension de modélisation dans cette activité, c'est plutôt la modélisation de l'objet pour déterminer s'il flotte ou pas avec les forces qui s'appliquent sur lui ». Cette idée est aussi présente dans le sous-groupe G2 qui situe le germe de situation dans le domaine de la mécanique avec l'introduction de la poussée d'Archimède comme exemple de force, en lien avec le programme de seconde : « *Identifier les actions modélisées par des forces dont les expressions mathématiques sont connues a priori* ». Ce choix est fondé sur la volonté explicite d'aborder la modélisation. Enfin, nous notons que la discussion du sous-groupe G2 porte sur plusieurs autres points : la définition d'un modèle, le fait que la modélisation pourrait renvoyer au passage par les calculs ou le fait qu'elle permet de faire le lien entre la comparaison des forces et celle des masses volumiques.

Par la suite, dans la discussion collective, des aspects de la modélisation sont abordés en creux. Par exemple, l'une des enseignantes évoque l'intérêt de demander aux élèves de prévoir ce qu'ils vont observer avant de faire l'expérience et semble implicitement rattacher cela à la modélisation. Une autre enseignante parle de « transposer » ou non la situation en interrogeant la pertinence de remplacer l'œuf par une boule par exemple. Cette proposition ne sera pas considérée par le collectif comme faisant partie d'une activité de modélisation.

5. – Conclusion sur la formation proposée en physique-chimie

5.1. - À propos de la modélisation

Les résultats obtenus permettent de valider notre première hypothèse selon laquelle une démarche de modélisation est mobilisée de manière implicite par les enseignants. Nous concluons que la modélisation relève d'un sa-

voir transparent pour les enseignants du collectif, dans la mesure où ils n'ont pas véritablement conscience qu'une activité de modélisation est à l'œuvre. D'autre part, leur acception du terme « modélisation » n'est pas en cohérence avec le sens qu'il revêt en didactique (nature et fonctions du modèle / activité de modélisation décrite dans le cadre de la théorie des deux mondes), ce qui valide également notre seconde hypothèse.

En outre, nous constatons que les résultats obtenus confirment les difficultés des enseignants — relevées dans la littérature — à appréhender et à enseigner l'activité de modélisation. Nous soulignons que, pour que la modélisation soit envisagée comme un enjeu d'enseignement, il est nécessaire que les enseignants puissent dévoluer aux élèves sa mobilisation dans une situation donnée. Cela ne peut se faire que s'ils acquièrent des connaissances idoines sur la modélisation.

5.2. - Le dispositif LSa : un levier pour le développement professionnel

Les enseignants de physique-chimie du secondaire dont nous avons analysé les propos, bien qu'intéressés par la modélisation (ils ont choisi d'être membres d'un groupe IREMS qui porte sur la modélisation en physique-chimie), ne sont pas acculturés à l'activité de modélisation telle qu'explicitée dans le cadre de la théorie des deux mondes. Ce résultat a pu être établi par l'analyse de propos tenus pendant la première journée de LSa, dont l'objectif principal était l'établissement d'une feuille de route pour la séance à mener en classe lors de la deuxième journée. Le collectif a fait le choix d'ancrer cette séance dans la réalité, notamment en faisant utiliser des œufs aux élèves. Par ailleurs, la question de la généralisation, que permet une activité de modélisation (visée prédictive du modèle), est restée implicite. Les enseignants ne se sont pas mis d'accord

sur une trace écrite concluant la séance en classe.

Pendant la troisième journée de formation, le dispositif LSa permet aux formatrices de donner des apports théoriques aux autres membres du collectif. Nous avons choisi d'axer une partie de nos apports sur la modélisation, en appui sur la théorie des deux mondes et en analysant, dans ce cadre, certaines difficultés rencontrées par les enseignants pendant J1 (par exemple : comment trouver une partie du programme qui mette en jeu la modélisation) et J2 (par exemple : choix de la trace écrite). Leurs retours tendent à montrer que ces apports leur ont permis de mieux cerner ce qu'est un modèle, quelles sont ses visées et quelles sont les dynamiques inhérentes à l'activité de modélisation (déplacements entre les deux mondes et entre les domaines).

6. – Vers un regard croisé avec les mathématiques

Nous présentons ici les premiers jalons d'une étude exploratoire en cours sur la comparaison entre les enjeux de formation sur la modélisation des enseignants de physique-chimie et de mathématiques. Pour démarrer cette étude, nous nous appuyons sur l'analyse de l'expérimentation précédemment décrite en physique-chimie et les résultats obtenus dans Yvain-Prébiski et Chesnais (2019) et Yvain-Prébiski et Masselin (2023) en mathématiques.

6.1. - Premier constat : difficulté commune à accompagner les élèves à dépasser le contexte concret

Que ce soit dans une situation de modélisation posée en classe de physique-chimie ou de mathématiques, notre premier constat montre une première difficulté des enseignants

pour amener les élèves à passer d'un problème posé dans un contexte concret à un problème de physique, de chimie ou de mathématiques. Cette étape qui relève de la mathématisation horizontale (Yvain-Prébiski, 2023) implique de faire des choix de grandeurs pertinentes et d'éléments de contexte en lien avec la question à étudier. Il est ensuite nécessaire de faire des hypothèses simplificatrices en vue d'élaborer un modèle dans la discipline concernée. Par exemple pour illustrer ce constat, en mathématiques, Yvain-Prébiski et Masselin (2023) mettent en évidence la difficulté des enseignants de mathématiques à accompagner les élèves dans une activité de modélisation mathématique, en particulier lors du passage de la situation concrète à un problème mathématique. Nous retrouvons cette difficulté pour les enseignants de physique-chimie concernés par la formation exposée précédemment. En effet, la mise en œuvre proposée par ceux-ci est pilotée par les connaissances notionnelles du programme à institutionnaliser mais sans prendre en considération la manière dont les élèves vont comprendre le passage du monde des objets à ces connaissances : c'est pourtant là un enjeu majeur de la modélisation et de son enseignement en classe.

6.2. - Deuxième constat : difficulté commune liée à l'identification des enjeux de modélisation

Notre deuxième constat est la mise en évidence d'une difficulté, commune aux enseignants en physique-chimie et en mathématiques, à bien identifier les enjeux de modélisation dans les activités proposées ou encore à proposer des mises en œuvre qui permettent aux élèves de mieux saisir ces enjeux. En effet, les analyses ont montré que les enseignants en physique-chimie concernés par l'étude précédente ne se saisissent pas pleinement du potentiel de modélisation de la situation de l'œuf dans leur proposition de mise en œuvre. Bien

que les échanges collectifs mettent en évidence qu'ils perçoivent des enjeux de modélisation dans la situation proposée, ils n'en font pas un enjeu d'apprentissage. Ce résultat fait écho au résultat obtenu à l'issue d'une étude des pratiques enseignantes mobilisées dans une activité de modélisation mathématique dans le secondaire (Yvain-Prébiski et Chesnais, 2019).

Nous pointons également que, tout comme la LSa en physique-chimie a montré que les enseignants se focalisaient sur la formule de la masse volumique, une LSa sur le germe « aire de baignade » en mathématique (Yvain-Prébiski et Masselin, 2023) a mis en évidence que les enseignants proposaient rapidement aux élèves de mobiliser des formules d'aires sans insister sur la mathématisation horizontale, et en identifiant peu les fragments de réalité associés au germe.

6.3. - Perspectives

Pour démarrer notre étude exploratoire sur la comparaison entre les enjeux de formation des enseignants de physique-chimie et de mathématiques sur la modélisation, nous envisageons de nous appuyer sur les travaux de Borromeo Ferri (2018) à propos des compétences des enseignants sur la modélisation mathématique. Quatre dimensions y sont décrites : la première est la dimension théorique qui met en évidence l'objectif et les différentes perspectives de la modélisation, la deuxième est la dimension des tâches comprenant les aptitudes à résoudre des activités de modélisation mathématique et à créer différents modèles, à évaluer des problèmes en termes de modélisation mathématique et à préparer des activités. Ces deux dimensions peuvent être considérées comme les étapes de la formation des idées de modélisation mathématique par les enseignants. La troisième est la dimension de l'enseignement qui se concentre sur les compétences des enseignants pour préparer un plan

de cours dans lequel ils utiliseront des tâches de modélisation, pour guider les élèves de la classe dans le processus de mise en œuvre, ainsi que pour soutenir ces élèves et pour leur fournir un retour d'information. Les dispositifs de LS tels ceux développés et étudiés dans cet article, que ce soit en mathématiques ou en physique-chimie, mettent en lumière ces dimensions dans les différents temps de préparation et d'analyse collectivement menés.

La dernière dimension est la dimension diagnostique qui comprend les étapes de suivi du processus de modélisation au fur et à mesure que les élèves accomplissent la tâche, l'identification des difficultés d'évaluation du travail des élèves pendant et après le processus de mise en œuvre.

Comme le souligne Borromeo Ferri (2018), ces quatre dimensions ne doivent pas être considérées comme indépendantes les unes des autres. Nous faisons l'hypothèse que, bien que définies dans le cadre des mathématiques, elles peuvent être mises à l'épreuve dans une activité de modélisation en physique-chimie car elles n'empêchent pas de prendre en compte les spécificités épistémologiques de cette discipline. Nous envisageons de comparer les analyses selon ces dimensions que nous mènerons en physique-chimie et en mathématiques. Cela pourrait mettre en évidence un défi important pour les enseignants lorsqu'ils mettent en œuvre des activités de modélisation dans leurs classes : pour enseigner les compétences de modélisation à leurs élèves, les enseignants doivent d'abord sélectionner des tâches appropriées, ce qui implique qu'ils soient capables de déterminer les propriétés des tâches de modélisation et de les distinguer des tâches traditionnelles. Pour ce faire, ils doivent avoir une connaissance des différents enjeux de la modélisation, comme l'objectif et les perspectives de la modélisation, les types de tâches de modélisation, la façon de préparer et de mettre en

œuvre des plans de cours appropriés pour la modélisation, la façon d'évaluer le processus de modélisation des élèves et de reconnaître leurs difficultés et leurs erreurs, et enfin la façon de concevoir des tâches de modélisation. Le dispositif LS, *via* ses spécificités dans ses adaptations (LSa) au contexte français, semble un terrain d'expérimentation approprié pour mener cette étude comparative du fait de ces spécificités et plus particulièrement les échanges collectifs autour du germe de situation, l'élaboration de la grille d'intervention de l'enseignant et les analyses *a posteriori* menées lors des temps de formation suivants (boucle 3 du dispositif, Masselin et Artigue, à paraître).

Alice DI FABIO

Université Paris Cité, Univ Paris Est Créteil, CY Cergy Paris Université, Univ. Lille, Univ Rouen, LDAR, F-75013 Paris, France
IREMS de Paris

Estelle TISON

Univ Rouen Normandie, Université Paris Cité, Univ Paris Est Créteil, CY Cergy Paris Université, Univ. Lille, LDAR, F-76000 Rouen, France
IREMS de Paris

Sandra JAVOY

Université d'Orléans, Université Paris Cité, Univ Paris Est Créteil, CY Cergy Paris Université, Univ. Lille, Univ Rouen, LDAR, F-75013 Paris, France
IREMS de Paris

Sonia YVAIN-PRÉBISKI

Université Claude Bernard Lyon 1, S2HEP UR 4148, Villeurbanne, 69622, France
IREM de Lyon

Blandine MASSELIN

Univ Rouen Normandie, Université Paris Cité, Univ Paris Est Créteil, CY Cergy Paris Université, Univ. Lille, LDAR, F-76000 Rouen, France
IREM de Rouen

Références bibliographiques

- Artigue, M. & Masselin, B. (2024). The role of institutional networks in the implementation of innovative collaborative devices of teacher professional development: The case of adapted lesson studies. *Implementation and Replication Studies in Mathematics Education*, 1(aop), 1-33.
<https://doi.org/10.4000/rdst.4165>
- Akatugba, A. H. & Wallace, J. (1999). Mathematical dimensions of students' use of proportional reasoning in high school physics. *School Science and Mathematics*, 99(1), 31-41.
<https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1999.tb17443.x>
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Librairie Philosophique J. Vrin.
- Barquero, B., Bosch, M. & Wozniak, F. (2019). Modelling praxeologies in teacher education: The cake box. Dans U. T. Jankvist, M. Van den Heuvel-Panhuizen & M. Veldhuis (dir.), *Proceedings of the Eleventh Congress of the European Society for Research in Mathematics Education* (p. 1144-1152). Freudenthal Group & Freudenthal Institute, ERME.
- Borromeo Ferri, R. (2018). *Learning how to teach mathematical modelling in school and teacher education*. Springer International Publishing.
- Bouard, R., Canac, S. & Kermen, I. (2022). Modélisation des transformations chimiques : Mise en regard d'un programme et de pratiques enseignantes. *RDST, Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 25, article 25.
- Clerc-Georgy, A. & Clivaz, S. (2016). Évolution des rôles entre chercheurs et enseignants dans un processus lesson study : Quel partage des savoirs ? Dans F. Ligozat, M. Charmillot & A. Müller (dir.) *Le partage des savoirs dans les processus de recherche en éducation* (p. 189).
<https://doi.org/10.7202/1059960ar>
- Clivaz, S. (2015). *Les Lesson Study ? Kesako ?*
<https://orfee.hepl.ch/bitstream/handle/20.500.12162/670/Clivaz%202015%20Les%20Lesson%20Study%20Kesako.pdf>
- Dawkins, K. R., Dickerson, D. L., McKinney, S. E. & Butler, S. (2008). Teaching density to middle school students: Preservice science teachers' content knowledge and pedagogical practices. *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas*, 82(1), 21-26.
<https://doi.org/10.3200/TCHS.82.1.21-26>
- de Hosson, C. & Elias, F. (2021). La théorie des deux mondes, un outil d'analyse d'une pratique enseignante innovante à l'université : Le cas de l'enseignement de la physique par l'escalade. *RDST, Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, article 24.
<https://doi.org/10.4000/rdst.4053>
- Di Fabio, A., Javoy, S. & Tison, E. (2025). Connaissances professionnelles mises en jeu par des enseignants de physique-chimie en début de formation sur la modélisation. Dans M. Munier & M. Bächtold (dir.), *Actes des XIII^e Rencontres scienti-*

- fiques de l'ARDiST, 4-7 juin 2024, Montpellier* (vol. V, p. 157-166). Éditions de l'ARDiST.
<https://hal.science/hal-04756608>
- Drouin, A.-M. (1988). Le modèle en questions. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 7(1), 1-20.
<https://doi.org/10.4267/2042/9214>
- Hankeln, C. & Hersant, M. (2020). Processus de modélisation et processus de problématisation en mathématiques à la fin du lycée : Une étude de cas dans une perspective de didactique comparée. *Éducation & Didactique*, 14(3), 39-67.
<https://doi.org/10.4000/educationdidactique.7776>
- Hashweh, M. Z. (2016). The complexity of teaching density in middle school. *Research in Science & Technological Education*, 34(1), 1-24.
<https://doi.org/10.1080/02635143.2015.1042854>
- Javoy, S., Decroix, A.-A. & de Hosson, C. (2018). La construction du concept physique de volume en cycle III : Quelles difficultés ? Quelles stratégies didactiques ? *6^e colloque Espace Mathématiques Francophone*.
<https://hal.science/hal-02198011>
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée*. Presses Universitaires de Rennes.
<https://hal.science/hal-01861711>
- Kermen, I. & Méheut, M. (2011). Grade 12 French students' use of a thermodynamic model for predicting the direction of incomplete chemical changes. *International Journal of Science Education*, 33(13), 1745-1773.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2010.519008>
- Koponen, I. T. (2007). Models and modelling in physics education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. *Science & Education*, 16(7), 751-773.
<https://doi.org/10.1007/s11191-006-9000-7>
- Lewis, C. & Perry, R. (2014). Lesson Study with Mathematical Resources: A Sustainable Model for Locally-Led Teacher Professional Learning. *Mathematics Teacher Education and Development*, 16(1), n1.
- Martinand, J.-L., Astolfi, J.-P., Chomat, A., Drouin, A.-M., Genzling, J.-C., Larcher, C., Lemeignan, G., Méheut, M., Rumelhard, G. & Weil-Barais, A. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. INRP.
<http://www.inrp.fr/recherche/Terminees/8995/A0051.htm>
- Masselin, B. (2020). *Ingénieries de formation en mathématiques de l'école au lycée. Des réalisations inspirées des Lesson Studies*. Presses Universitaires de Rouen et du Havre (PURH).
<https://hal.science/hal-03198032>

FORMER À L'ENSEIGNEMENT DE LA MODÉLISATION EN PHYSIQUE-CHIMIE - ÉTUDE EXPLORATOIRE D'UNE FORMATION FONDÉE SUR UN DISPOSITIF LESSON STUDIES INITIÉ EN MATHÉMATIQUES

- Masselin, B. & Artigue, M. (2023). How the situation seeds used in adapted lesson studies support the collaborative work of facilitators and future facilitators. Dans *Thirteenth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education (CERME13)* (p. 23). Alfréd Rényi Institute of Mathematics ; ERME.
<https://doi.org/10.4000/educationdidactique.2502>
- Masselin, B. & Artigue, M. (à paraître). Le rôle des germes de situation dans un dispositif de formation des enseignants adapté des lesson studies. *Caminhos da Educação Matemática em Revista - CEMeR*.
- Masselin, B. & Hartmann, F. (2020). Un dispositif de formation inspiré des Lesson Studies dans l'académie de Rouen. *Repères IREM*, 120, 43-61.
- Molvinger, K., Chesnais, A. & Munier, V. (2017). L'enseignement de la masse à l'école élémentaire : Pratiques d'une enseignante débutante en éducation prioritaire. *RDST, Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 15, article 15.
<https://doi.org/10.4000/rdst.1501>
- Morge, L. & Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de notion de modèle : Quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? *Spirale - Revue de recherches en éducation*, 52(1), 149-175.
<https://doi.org/10.3406/spira.2013.1066>
- Pélissier, L. & Venturini, P. (2016). Analyse praxéologique de l'enseignement de l'épistémologie de la physique : Le cas de la notion de modèle. *Éducation & didactique*, 10(2), 63-90.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1941). *Le développement des quantités chez l'enfant*. Delachaux & Niestle.
- Robardet, G., & Guillaud, J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques : De la recherche à la pratique : Théories, modèles, conceptions et raisonnement spontané*. Presses Universitaires de France.
- Soler, L. (2013). Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie. *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52(1), 177-214.
<https://doi.org/10.3406/spira.2013.1067>
- Takahashi, A. & McDougal, T. (2016). Collaborative lesson research: Maximizing the impact of lesson study. *ZDM*, 48, 513-526.
- Tiberghien, 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.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles : Introduction critique à l'analyse de systèmes : essai*. Éditions du Seuil.
- Wozniak, F. (2012). Analyse didactique des praxéologies de modélisation mathématique à l'école : une étude de cas. *Éducation & didactique*, 6(2), 65-88.
<https://doi.org/10.4000/educationdidactique.1471>

- Yvain-Prébiski, S. (2023). La mathématisation horizontale : Quels apports pour une recherche sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation mathématique ? Dans *Nouvelles perspectives en didactique des mathématiques : La preuve, la modélisation et les technologies numériques. Volume des séminaires et posters des actes de EE21* (p. 209-219).
<https://hal.science/hal-04090770>
- Yvain-Prébiski, S. & Masselin, B. (2023). La modélisation à partir d'une situation extra-mathématique. *Repères-IREM*, 131.
<https://hal.science/hal-04206874>
- Yvain-Prébiski, S. & Chesnais, A. (2019) Horizontal mathematization: a potential lever to overcome obstacles to the teaching of modelling. Dans U. T. Jankvist, M. Van den Heuvel-Panhuizen & M. Veldhuis, (dir.), *Proceedings of Eleventh Congress of the European Society for Research in Mathematics Education* (p. 1284-1292). Freudenthal Group & Freudenthal Institute, ERME.
- Ministère de l'Éducation Nationale et de la Jeunesse (MENJ) (2019). Programme de l'enseignement de physique-chimie de la classe de seconde générale et technologique. MENJ, 22 janvier 2019.
<https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special1/MENE1901634A.htm>
- Ministère de l'Éducation Nationale, de la Jeunesse et des Sports (MENJS) (2020). *Programme d'enseignement du cycle des approfondissements (cycle 4) (BO n° 31 du 30 juillet 2020)*.
- Ministère de l'Éducation Nationale (MEN) (2023). *Programme de sciences et technologie du cycle 3 (BO n° 25 du 22 juin 2023)*.