



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Retombées d'une formation donnée à des enseignantes de chimie du secondaire sur leur enseignement du concept de mole

Personnes autrices

Simone Abou Halloun, chargée de cours, Université de Montréal, Canada, simone.abou.halloun@umontreal.ca

Marcel Thouin, professeur titulaire, Université de Montréal, Canada, marcel.thouin@umontreal.ca



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Déclaration de l'usage de l'IA dans l'élaboration de cet article

- Aucun usage de l'IA dans l'élaboration de l'article
- Recension des écrits utilisés dans l'article
- Idéation, élaboration du plan de l'article
- Rédaction de passages de l'article (utilisés tels quels ou modifiés par l'auteur)
- Reformulation ou réécriture de passages formulés initialement par l'auteur
- Analyse de données présentées dans l'article
- Création d'images, de figures, etc. présentées dans l'article
- Correction linguistique de l'article
- Vérification des normes bibliographiques
- Autre (précisez) :



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Résumé

En chimie, l'enseignement du concept de la quantité de matière dont l'unité est la mole présente des difficultés d'origine épistémologique et didactique. L'objectif de cette recherche de développement de type *design-based research*, menée auprès de six enseignantes du secondaire, était d'étudier les retombées d'une formation sur l'évolution de leurs connaissances professionnelles en enseignement du concept de la mole. Une analogie modélisante, fondée sur la littérature scientifique, a été conçue pour enseigner le concept. L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus montrent que la formation a eu des retombées positives.

Mots-clés : mole; formation des enseignants; analogie modélisante; *design-based research*; obstacles didactiques



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Problématique

L'enseignement et l'apprentissage de la chimie, et plus particulièrement du concept de la quantité de matière dont l'unité est la mole, posent de nombreux problèmes. Les adaptations du concept scientifique, afin que ce dernier devienne un concept scolaire, ont créé un savoir déproblématisé et anhistorique (Furió et al., 2000; Padilla et Furió-Mas, 2008) présenté avec certaines imprécisions sémantiques (Pekdağ et Azizoğlu, 2013), ce qui peut conduire les élèves à confondre des masses, des moles et des quantités de matière.

De plus, en chimie, l'antagonisme microscopique-macroscopique est un obstacle majeur (Barlet et Plouin, 1997). Johnstone (1993) et Taber (2013) insistent sur les liens à créer entre les trois domaines du savoir en chimie, soit le macroscopique, le sous-microscopique et le symbolique. Cependant, l'établissement de liens entre ces domaines est souvent problématique pour les enseignants et enseignantes (Levy et al., 2004), encore plus dans le cas de la mole. Plusieurs personnes ne distinguent pas les aspects « nombre » (c.-à-d. le regroupement des entités chimiques à l'échelle sous-microscopique) et « masse » (c.-à-d. le fait de dénombrer en pesant à l'échelle macroscopique) de la mole. S'ajoute un domaine symbolique difficile, avec les symboles des variables (n , m et M) et du nombre d'Avogadro (N_A et non Na), ce qui risque de produire des obstacles didactiques chez les élèves (Fang et al., 2016; Kolb, 1978).

L'évolution socio-historique de la mole est à l'origine d'obstacles épistémologiques et didactiques (Abou Halloun et Thouin, 2021). Vers 1900, la mole a été définie par Wilhelm Ostwald comme étant la masse d'une substance, exprimée en grammes, numériquement égale à son poids normal. En 1961, la mole a été adoptée comme concept pour compter les entités chimiques et c'est « le nombre de moles » qui était calculé jusqu'en 1971. Le terme « mole » a été conservé, car en latin il désigne un tas. En 1971, la 14^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a reconnu la mole comme la septième unité et a nommé « quantité de matière » le concept associé. Les définitions du concept ont été réitérées et la dernière, présentée plus loin, a été formulée lors de la 26^e CGPM en novembre 2018. Il n'est donc pas étonnant de retrouver certaines conceptions alternatives autant chez le personnel enseignant que chez les élèves. Par exemple, la quantité de matière dont l'unité est la mole est une masse ou un volume (Kolb, 1978). En passant tout d'abord d'une masse à une quantité (Padilla et Furió-Mas, 2008), puis d'un concept indépendant à une unité du concept de quantité de matière, la mole est devenue plus problématique (Kolb, 1978; Padilla et Furió-Mas, 2008). D'ailleurs, l'expression « quantité de matière » évoque les propriétés physiques de la matière à l'échelle macroscopique, ce qui pourrait renforcer les conceptions citées (Schmidt-Rohr, 2020). Des suggestions de Nelson (1991), de Baranski (2012) et de Rocha-Filho (1999/2011) afin de remplacer le nom du concept n'ont pas abouti.

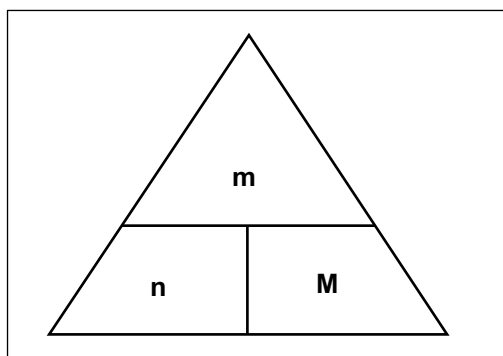


REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Les multiples définitions de la mole auraient causé la confusion des personnes enseignantes. Dans ces définitions, le mot *mole* se retrouve associé aux trois sens suivants : 1) c'est une masse, exprimée en molécules-grammes ou en atomes-grammes; 2) c'est une portion de substance, exprimée en unité de masse; 3) c'est un nombre, ce qui implique que la quantité de substance est proportionnelle à un nombre spécifique d'entités chimiques (Kolb, 1978).

L'élève, pour sa part, se heurte à diverses difficultés durant ses apprentissages. Par exemple, plusieurs recherches (Furió-Mas et al., 2002; Moss et Pabari, 2010) montrent que les élèves résolvent des problèmes au sujet de la mole en appliquant des algorithmes de calcul sans toujours comprendre ce qu'ils font. En outre, le concept de mole possède deux aspects complexes pour les élèves. D'une part, l'aspect qualitatif du concept, soit le groupement des entités, est contre-intuitif, puisque les élèves croient que la matière est continue. D'autre part, l'aspect quantitatif, soit le calcul de quantité de matière, exige des élèves qu'ils soient à l'aise avec les grands nombres (comme la constante d'Avogadro), la notation scientifique, les opérations sur ces nombres (Bou Jaoudé et Barakat, 2003) et une relation de proportionnalité qu'ils ont souvent de la difficulté à modéliser. Le langage pose également des problèmes terminologiques en raison du grand nombre de définitions différentes de la mole (Furió-Mas et al., 2002) ainsi que des confusions phonétiques ou graphiques avec le mot *molécule*, l'expression *masse molaire* ou le symbole du nombre d'Avogadro (N_A), lequel ressemble à celui du sodium (Na). Par conséquent, les élèves rencontrent plusieurs difficultés : 1) ils ont recours à des algorithmes dépourvus du sens de l'opération (voir la figure 1, qui illustre le triangle utilisé pour gérer la formule de la quantité de matière); 2) ils ont de la difficulté à s'appropriier le concept, considéré comme contre-intuitif ou complexe; 3) ils n'appréhendent pas le langage associé au concept. Ces difficultés sont typiques d'un obstacle d'apprentissage (Astolfi et al., 2008; Perkins, cité dans Meyer et Land, 2006).

Figure 1
L'équation ($n = \frac{m}{M}$) de la mole dans un triangle





REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Outre les obstacles épistémologiques décrits ci-dessus, les obstacles d'apprentissage, dans le cas du concept de mole, possèdent d'autres origines. Ce sont principalement des obstacles ontogéniques, puisque les élèves, à la fin du secondaire, n'ont pas encore développé la pensée formelle nécessaire pour appréhender les concepts abstraits (Herron, 1975). Il existe également des obstacles didactiques, étant donné que, faute de connaissances disciplinaires, épistémologiques et didactiques, les personnes enseignantes ont parfois du mal à gérer la transposition didactique interne de ce concept. En réalité, les enseignants et enseignantes ne vivent pas un changement conceptuel durant leur parcours scolaire. Durant leurs études universitaires, leurs connaissances épistémologiques sont négligées aux dépens d'un enseignement opératoire du concept (Furió et al., 2000).

En conséquence, ces problèmes d'enseignement de la chimie et du concept de mole trouvent en bonne partie leur origine dans la formation des enseignants et des enseignantes. En effet, la formation initiale développe peu l'épistémologie des savoirs disciplinaires, essentielle pour enseigner un concept (Furió et al., 2000). Elle se concentre aussi sur les aspects théoriques de la didactique plutôt que ses aspects pratiques (Boilevin, 2013).

Comme le soutiennent plusieurs chercheurs, (Furió et al., 2000; Kolb, 1978), l'analogie est un outil de base dans l'enseignement du concept de mole. L'enseignement par analogie est reconnu pour son efficacité tant sur le plan épistémologique du savoir que sur le plan psycho-cognitif (Dupin et Joshua, 1994). D'une part, c'est une stratégie qui soutient l'apprentissage de concepts abstraits à partir de références concrètes (Heywood et Parker, 2009); d'autre part, c'est un outil cognitif pour développer des habiletés théoriques en sciences (Heywood et Parker, 2009). En revanche, l'analogie la plus utilisée dans le matériel didactique est la douzaine et la dizaine. Bien qu'elle permette de montrer l'idée du regroupement (Schmidt-Rohr, 2020), elle n'est pas efficace. Les nombres douze et dix, faciles à dénombrer, font référence au domaine macroscopique et n'aideraient pas les élèves à appréhender le regroupement d'un immense nombre d'entités sous-microscopiques qu'on peut porter dans une main (Gorin, 1994; Kolb, 1978; Vogel, 1992).

Dans cet esprit, la recherche de doctorat décrite dans le présent article a comme objectif général d'étudier les retombées d'une formation donnée à des enseignantes de chimie du secondaire sur l'évolution de leurs connaissances professionnelles en enseignement du concept de mole.

Cadre théorique

La dernière définition de la mole, proposée par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), est la suivante :



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6,02214076 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro, N_A , lorsqu'elle est exprimée en $\text{mol}^{-1} \left[\frac{1}{\text{mol}} \right]$.

La quantité de matière, symbole n, d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules. (26^e CGPM, 2018).

Fang et al. (2016) distinguent deux aspects du concept de mole : un aspect nombre (la mole correspond à un groupement d'entités chimiques équivalent au nombre d'Avogadro) et un aspect masse (compter en pesant). Chacun de ces deux aspects devrait être acquis par l'élève, qui a aussi besoin de créer un lien entre les deux pour construire les modèles théoriques.

Le concept qui consiste à compter les entités sous-microscopiques en ayant recours à des variables physiques (masse, volume, etc.) est contre-intuitif. Pour aider l'élève, l'enseignant ou l'enseignante peut avoir recours à une analogie dont les composantes sont un domaine de référence (un savoir connu) qui permet de construire le concept scientifique, nommé le domaine cible (Cauzinille-Marmèche et al., 1985; Glynn, 2007; Heywood et Parker, 2009; Sarantopoulos et Tsapalis, 2004). Néanmoins, la précision des ressemblances et des limites entre les deux domaines est indispensable afin d'éviter la géométrisation foudroyante (Bachelard, 1938) qui risque de produire de nouvelles conceptions alternatives.

Pour réussir l'enseignement par analogie, il importe de trouver le domaine de référence qui offre le plus de ressemblances avec le domaine cible (systèmes, grandeurs, propriétés, etc.) (Dupin et Joshua, 1994; Sarantopoulos et Tsapalis, 2004). Le domaine de référence est un domaine bien connu par l'élève : il lui permet de construire, par comparaison, des composantes du domaine cible, soit du concept scientifique. Par exemple, on peut recourir à l'analogie de l'eau circulant dans un tuyau (domaine de référence) pour expliquer la tension et l'intensité du courant électrique dans un circuit simple (domaine cible). Dans le cas de la mole, les enseignantes ont pensé à ses similitudes avec un regroupement de grains et la masse de ces derniers, qui permet de les compter. Toutefois, la réussite de l'analogie dépend entre autres des trois facteurs suivants : 1) le développement psycho-cognitif de l'élève, puisqu'un raisonnement d'un niveau d'abstraction relativement élevé est nécessaire pour percevoir les ressemblances entre le domaine de référence et le domaine cible; 2) la gestion de la situation, afin que la situation de référence ne domine pas et ne bloque pas le raisonnement



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

analogique; 3) la pertinence de la situation, qui permet d'éviter une confusion entre les deux domaines (Dupin et Joshua, 1994).

La modélisation est, d'un point de vue épistémique, la principale activité scientifique (Thouin et Abou Halloun, 2023). Le modèle crée une articulation entre la théorie et l'expérience, de même qu'il structure et simplifie des phénomènes en faisant ressortir leurs éléments essentiels (Martinand, 2010; Ney, 2006). Les modèles peuvent être concrets (p. ex. la représentation d'un fonctionnement) ou théoriques (p. ex. la construction d'un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène, tel que celui des relations entre des variables) (Thouin et Abou Halloun, 2023).

La dualité macroscopique-microscopique est fondamentale en chimie. La modélisation du domaine sous-microscopique, qu'on ne peut percevoir, devrait expliquer ce qui est observable à l'échelle macroscopique (Barlet et Plouin, 1997). D'où le choix, dans le cadre de cette recherche, de l'« analogie modélisante » (Dupin et Joshua, 1989) pour enseigner le concept de la quantité de matière dont l'unité est la mole. Dans ce cas, on cherche à faire construire par l'élève une représentation du monde sous-microscopique, où les particules ne sont pas dénombrables et où leur nombre est essentiel pour les analyses quantitatives à l'échelle macroscopique. Dans ce genre d'analogie, les deux domaines présentent un grand isomorphisme de structure, le domaine de référence est plus simple que le domaine cible et la description du domaine de référence rend plausible l'explication dans le domaine cible (Dupin et Joshua, 1989). L'utilisation de telles analogies facilite un raisonnement analytique chez l'élève en l'aidant à comprendre la nature des parties et leur relation à l'ensemble (Heywood et Parker, 2009).

Dans cette recherche doctorale, l'évolution des connaissances des personnes enseignantes a été documentée grâce à la typologie des types de connaissances de Shulman (1986). Voici les trois types de connaissances dont il est question : les connaissances du contenu disciplinaire, les connaissances du contenu didactique et pédagogique et les connaissances du contenu curriculaire. Shulman précise que la personne enseignante doit s'appropriier un contenu disciplinaire approfondi, ce qui signifie aller au-delà des faits, des énoncés et des théories pour acquérir des structures synthétiques qu'elle pourra mettre à profit en se servant d'un langage disciplinaire pertinent. L'enseignement de ce contenu disciplinaire dépend de la maîtrise de connaissances pédagogiques et didactiques, comme les conceptions alternatives des élèves. Ces connaissances sont « professionnelles » parce qu'elles sont construites au cours d'une formation professionnelle ou continue.

Duit (2007) modélise les connaissances professionnelles des enseignants et enseignantes de sciences en établissant des liens avec les disciplines scientifiques, mais aussi avec l'histoire des sciences, la philosophie des sciences, la pédagogie, la psychologie et d'autres disciplines de références (comme les langues).



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Duit signale que la chimie, comme discipline scolaire, se distingue de la chimie comme science de la nature. Par conséquent, le processus de développement des connaissances professionnelles d'une personne enseignant la chimie doit être élaboré à partir des recherches en sciences de l'éducation qui comportent des dimensions pratique, technique et scientifique. Le mode pratique se rapporte aux pratiques professionnelles en classe, le mode technique concerne les outils (matériel didactique, matériel de laboratoire) et le mode scientifique porte sur les recherches en chimie et en sciences de l'éducation.

Duit (2007) propose un modèle de formation, l'*Educational Reconstruction*, qui respecte une épistémologie constructiviste et dans lequel il distingue plusieurs éléments : 1) l'analyse des contenus et des structures conceptuelles; 2) les recherches sur l'enseignement et l'apprentissage, qui ciblent les conceptions et les méthodes des enseignants et enseignantes; 3) le développement et l'évaluation dans les classes réelles.

Ce modèle a été appliqué dans le cadre de notre recherche. D'une part, la formation comporte un volet théorique : l'épistémologie du concept est explicitée et le contenu disciplinaire à enseigner est structuré sur la base de résultats de recherche en sciences de l'éducation. D'autre part, la formation intègre un volet pratique : le travail d'équipe est mis en valeur pour planifier, piloter et évaluer une séquence d'enseignement du concept de mole. Les enseignantes étaient encadrées pour construire une analogie modélisante.

Le modèle de formation continue de l'*Educational Reconstruction* (Duit 2007, p. 4), a été au cœur de notre *design-based research* (DBR) qui poursuivait les objectifs spécifiques qui suivent :

- Mettre en place un dispositif de formation, conforme au DBR, visant la construction d'une analogie modélisante pour enseigner la mole ;
- Déterminer les retombées du dispositif de formation mis en place sur l'évolution des connaissances professionnelles des enseignantes.

Méthodologie

Le DBR est une recherche de développement qui s'inspire des travaux d'Ann Brown (1992) et d'Alan Collins (1992). Il s'agit d'une méthode de recherche à la fois théorique, pragmatique et collaborative. Elle est d'abord théorique car elle contribue à établir des principes. Ensuite, elle se révèle pragmatique, étant donné qu'elle intervient dans divers contextes pour réitérer et adapter les designs. Enfin, elle s'avère collaborative dans la mesure où elle crée le pont entre les communautés issues des mondes de l'enseignement et de la recherche. Le DBR doit satisfaire aux critères de scientificité d'une recherche et contribuer à établir des principes (Barab



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

et Squire, 2004; Mckenney et Reeves, 2012) de développement professionnel des personnes enseignantes (Bannan-Ritland et Baek, 2008). Au sein de cette recherche, le principe était la construction d'une analogie modélisante.

La présente recherche s'est déroulée au Liban, pays francophone. Six enseignantes de chimie de niveau troisième (secondaire 4) ont participé. Dans l'article, ces six enseignantes sont désignées par les codes E1 à E6. Le nombre d'années d'expertise des enseignantes variait entre 1 et 15 ans. Quatre enseignantes avaient une classe d'une trentaine d'élèves, les deux autres, d'une dizaine d'élèves. Le milieu socio-économique de l'ensemble des élèves, dont l'âge moyen est de 15 ans, était plutôt défavorisé et les classes étaient hétérogènes du point de vue des niveaux socio-économique et scolaire.

Le cycle complet du DBR (appelé un « macrocycle ») réalisé était formé de cinq cycles nommés « mésocycles » : un mésocycle d'analyse et d'exploration, trois mésocycles de construction et d'amélioration du matériel didactique et un mésocycle d'analyse et de réflexion. Le cycle complet a duré environ sept mois.

Le mésocycle d'analyse et d'exploration, qui a duré environ deux mois, visait à définir le problème. Les objectifs de ce mésocycle étaient de déterminer le modèle pédagogique des enseignantes et d'établir les difficultés d'enseignement vécues par les enseignantes ainsi que les solutions adoptées. Deux outils ont servi à l'atteinte de ces objectifs :

1. L'analyse des fiches de planification des enseignantes. Ces fiches portaient sur la présentation et l'organisation de l'information, le contenu scientifique (définitions, modèles, analogies etc.) et l'approche didactique (exposé, résolution de problèmes, etc.).
2. L'animation d'un groupe de discussion. D'abord, pour une durée de 15 minutes, le débat portait sur le curriculum et la place de la mole au sein de ce dernier. Puis, durant 125 minutes, les participantes ont parlé de l'enseignement de la chimie de façon générale (de celui de la mole plus particulièrement) ainsi que des difficultés d'enseignement et d'apprentissage observées en chimie, plus particulièrement dans le cas de la mole.

Ensuite, trois mésocycles de perfectionnement professionnel et de conception de matériel didactique se sont enchaînés pendant environ quatre mois. Chacun de ces mésocycles a duré de trois à quatre semaines et comportait un microcycle d'analyse et d'exploration (faire un retour sur des résultats obtenus au microcycle ou mésocycle précédent et animer des activités de perfectionnement), un microcycle de conception de matériel didactique (la conception ou l'amélioration et la mise à l'essai de la séquence d'enseignement) de même qu'un microcycle d'évaluation et de réflexion (retour réflexif des enseignantes, qui ont fait une mise à l'essai de la séquence).



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Les objectifs à atteindre, durant ces mésocycles, étaient d'animer des activités de perfectionnement ainsi que d'encadrer les enseignantes dans la construction et l'amélioration du matériel didactique.

Le mésocycle 2 a débuté avec des activités de perfectionnement qui portaient sur les aspects suivants : les difficultés d'enseignement et d'apprentissage en chimie; les conceptions et les obstacles relatifs au concept de la mole; l'enseignement avec les analogies; la modélisation en chimie; l'évolution socio-historique de la mole. Après ce microcycle d'analyse et d'exploration, les enseignantes ont planifié une première version des activités d'apprentissage. Ensuite, deux des enseignantes ont animé la séance dans leur classe. Le mésocycle s'est terminé avec le microcycle d'analyse et de réflexion. À la suite des recommandations de ces deux enseignantes, un nouveau mésocycle a été déclenché.

Le mésocycle 5, un mésocycle d'évaluation et de réflexion, a conclu la recherche en fournissant des réponses aux objectifs de la recherche. Les outils de collecte de données étaient les suivants :

1. L'animation d'un groupe de discussion (environ 90 minutes). L'échange a porté essentiellement sur le déroulement des mises à l'essai, les observations au sujet des élèves, les retombées du DBR sur l'enseignement.
2. Des entretiens individuels de 45 minutes chacun. Durant ces entretiens, chaque enseignante a parlé de son vécu personnel durant la formation. Ces entretiens ont permis de préciser les informations obtenues lors de la discussion en groupe.

L'approche méthodologique était qualitative. Afin que le premier objectif de recherche soit atteint, la séquence d'enseignement planifiée a été analysée en comparant les choix des enseignantes avec ceux présents dans la littérature scientifique. D'ailleurs, une triangulation des méthodes de collecte de données a permis d'augmenter la fiabilité des informations au sujet du développement des connaissances professionnelles, l'objet du deuxième objectif. Ainsi, les outils de collecte de données ont varié, reposant entre autres sur l'analyse des planifications, des groupes de discussion, des retours réflexifs et des entretiens individuels. Les transcriptions ont été codées sur le logiciel *QDA Miner*. Les catégories et sous-catégories retenues sont présentées plus loin sous forme de tableaux montrant leur fréquence.

Résultats

Les résultats de l'analyse des données recueillies sont divisés en trois sections, selon les mésocycles. Les résultats du mésocycle 1 illustrent les besoins en formation, les résultats des mésocycles 2, 3 et 4 représentent l'évolution des connaissances professionnelles durant la



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

formation, et ceux du mésocycle 5 permettent de répondre aux objectifs de la recherche.

Le mésocycle 1 : analyse et exploration

Durant ce mésocycle, la chercheuse devait établir l'état des connaissances professionnelles des enseignantes, telles que définies selon Shulman (le contenu disciplinaire, le contenu didactique et pédagogique et le contenu curriculaire).

En ce qui concerne les connaissances disciplinaires, les enseignantes questionnées à propos de ce concept l'ont associée à une application des modèles mathématiques. Elles n'en ont pas mentionné la définition et n'ont pas su établir de liens entre les trois domaines (sous-microscopique, macroscopique et symbolique) du savoir pour la mole. Elles s'intéressent à une application passive des formules et veulent enseigner ces algorithmes.

Pour ce qui est des connaissances didactiques et pédagogiques, la collecte de données réalisée durant ce mésocycle confirme un besoin de formation.

Tout d'abord, l'analyse des propos des enseignantes, recueillis lors d'un groupe de discussion, et de leurs fiches de préparation de cours montre la dominance d'une approche d'enseignement traditionnelle. Par exemple, les enseignantes ont utilisé les verbes mémoriser (11 fois), étudier (7 fois), retenir (6 fois), réciter (5 fois) et expliquer (3 fois). D'ailleurs, questionnées quant à leur approche didactique, elles confirment qu'elles enseignent la mole d'une façon encyclopédique en se limitant aux formules à appliquer et en proposant quelques exercices d'application. Selon elles, le concept est très abstrait et peu important dans la progression des apprentissages de la classe de troisième. « C'est noté pour 1 point sur 20 à l'examen du ministère », disent trois enseignantes (E3, E4, E6). Elles ne planifient que les deux ou trois séances suggérées par le ministère pour l'enseignement de la mole.

Ensuite, durant le groupe de discussion, les enseignantes ne remettent pas en question leurs connaissances didactiques et pédagogiques pour enseigner la mole. Elles expliquent les difficultés d'apprentissage des élèves par un manque de compétences en mathématiques et des difficultés propres aux concepts de chimie, comme les confusions phonétiques (mol, molécules, masse molaire), les difficultés à s'approprier le langage symbolique (N_A vs Na ; la confusion des symboles n , m et M) et l'appréhension du concept (sens, définition). Elles ne planifient pas de séances de remédiation et conseillent aux élèves de répéter les exercices.

Enfin, l'analyse des planifications et les propos des enseignantes ont confirmé que ces dernières, faute de connaissances pédagogiques et



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

didactiques, se réfèrent aux manuels scolaires, utilisent les analogies de la douzaine et de la dizaine, et enseignent les formules d'une façon opératoire.

En ce qui concerne les connaissances curriculaires, les enseignantes ont manifesté de bonnes connaissances du programme et de la place du concept dans la progression des apprentissages. Elles comprennent également les attentes du ministère au sujet de l'enseignement de la chimie, plus particulièrement du concept de la mole, et des examens ministériels. Ces connaissances ne seront plus considérées dans les résultats des prochains mésocycles.

Les résultats de ce mésocycle confirment que les objectifs de la formation étaient donc des besoins bien réels.

Les mésocycles 2, 3 et 4 : conception et amélioration du matériel didactique

La construction du matériel didactique a eu lieu après l'animation des activités de perfectionnement au mésocycle 2. La planification de la séquence d'enseignement est présentée ci-dessous.

Activités dans le domaine de référence

- Les élèves créent un protocole expérimental qui permet de séparer, sans dénombrer, $3,75 \times 10^5$ grains de sucre. Quand les élèves demandent une référence, on leur indique que $1,5 \times 10^5$ grains de sucre ont une masse de 27 grammes.
- Les élèves répètent ce protocole avec le poivre et il leur est indiqué que $1,5 \times 10^5$ grains de poivre ont une masse de 45 grammes.
- Les élèves choisissent un nom arbitraire pour le nombre $1,5 \times 10^5$ ainsi que pour le groupement réalisé.
- Les élèves complètent un « texte à trou » en utilisant les noms qu'ils ont choisis et les valeurs exploitées dans leur protocole expérimental.

Activités de transfert

- Les élèves effectuent la simulation *Scale of the Universe* (<https://scaleofuniverse.com/fr>), qui présente les ordres de grandeur, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.
- La personne enseignante explique le concept de mole aux élèves et les introduit aux termes scientifiques appropriés.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Activités dans le domaine cible

- Les élèves complètent un « texte à trou » en utilisant des définitions et des termes scientifiques.
- Les élèves réalisent des activités de réinvestissement des connaissances.

Les activités avec les grains de sucre et de poivre forment le domaine de référence de l'analogie. Dans les consignes, les enseignantes ont demandé aux élèves de trouver un moyen pour séparer un nombre donné de grains, sans les dénombrer. Au moment opportun, quand les élèves ont réalisé le besoin de regrouper et de peser, elles leur fournissent la masse moyenne de chacun des groupements de $1,5 \times 10^5$ de grains de sucre et de poivre. Elles ont décidé de laisser les élèves choisir les noms du nombre ($1,5 \times 10^5$) et du groupement qui seront utilisés dans toutes les tâches dans le domaine de référence.

Le domaine de référence, soit regrouper les grains et les peser, présente un bon nombre de ressemblances avec le domaine cible, soit la mole (voir tableau 1), mais comporte aussi des limites. Par exemple, la disposition des atomes dans la matière n'est pas identique à la structure des grains qui forment un solide pulvérisé.

Tableau 1
Les similitudes entre le domaine de référence et le domaine cible

Domaine de référence	Ressemblance	Domaine cible
Le nombre $1,5 \times 10^5$.	Un nombre avec une puissance de 10.	Le nombre d'Avogadro (6×10^{23}).
Un nombre élevé de grains qu'on peut prendre par poignée.	Le besoin de regroupement.	Un nombre élevé d'entités qui se retrouvent dans une quantité relativement petite.
L'utilisation de noms familiers pour le nombre $1,5 \times 10^{23}$ et pour le regroupement.	Le nom d'un nombre qui se distingue du nom du nombre du regroupement.	Les noms « nombre d'Avogadro » pour la valeur 6×10^{23} et « mole » pour le regroupement.
Les grains ne doivent pas être dénombrés. On les compte en les pesant.	Les aspects de la mole.	Le regroupement en mole n'est pas mesuré directement par un instrument de mesure.
Durant les activités, les élèves obtiennent des nombres décimaux.	Une quantité en mole peut être fractionnée.	Dans un calcul, les élèves pourront obtenir un nombre décimal.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

La masse donnée pour un nombre de grains est une masse moyenne, puisque les grains n'ont pas exactement les mêmes dimensions.	La masse molaire.	Dans une matière, un élément se retrouve sous la forme de ses isotopes et la masse donnée est la masse moyenne des isotopes.
---	-------------------	--

La simulation *Scale of Universe* montre d'une façon interactive les dimensions sous-microscopiques de la matière. L'enseignante peut ainsi amorcer le transfert vers le domaine cible en montrant les ressemblances et les limites de l'analogie, en présentant le langage scientifique et en confirmant les modèles théoriques relatifs au calcul de la quantité de matière.

Après l'expérimentation dans leur classe, au mésocycle 2, les enseignantes ont proposé d'ajouter des activités, dans le domaine de référence et dans le domaine cible, qui reliaient le volume à la quantité de matière. Par exemple, les élèves déterminent le nombre de molécules de saccharose dans 50 millilitres de sucre. La version révisée a été expérimentée au cours des mésocycles 3 et 4.

Au cours du mésocycle 3 et après un retour sur les erreurs sémantiques et les repères culturels, les enseignantes ont révisé le langage utilisé dans leur matériel didactique pour s'assurer que les domaines macroscopique et sous-microscopique avaient été abordés dans toutes les activités. Elles ont aussi ajouté des repères culturels pour présenter des scientifiques comme Wilhelm Ostwald, Amedeo Avogadro ou André-Marie Ampère.

Afin de mieux analyser le retour réflexif des enseignantes au début des mésocycles 2, 3 et 4 et d'établir s'il s'est produit une évolution des connaissances professionnelles des enseignantes, les commentaires de ces dernières ont été transcrits puis analysés à l'aide du logiciel *QDA Miner*. Les catégories identifiées étaient en lien avec des connaissances disciplinaires ainsi que des connaissances didactiques et pédagogiques. Elles sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2
Les catégories et les codes de l'analyse qualitative du retour réflexif des enseignantes

Catégories	Sous-catégories	Nombre d'enseignantes
Connaissances disciplinaires	Maitrise du concept	6
Connaissances didactiques et pédagogiques	Intervention par défi	6
	Développement des habiletés	6
	Développement des attitudes	5
	Difficultés persistantes	2



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

En ce qui concerne les connaissances disciplinaires, les enseignantes ont affirmé maîtriser le concept. Durant la conception du matériel didactique, elles ont fait preuve d'une bonne appropriation du sens de la mole en distinguant l'aspect nombre de l'aspect masse. Elles ont reconnu l'importance de ce concept pour relier le domaine sous-microscopique au domaine macroscopique. De même, elles ont relevé que les modèles mathématiques et le langage y jouent un rôle essentiel. Elles ont mieux appréhendé les définitions, la transition entre le macroscopique (mesure de masse) et le sous-microscopique (nombre d'entités) ainsi que le langage symbolique associé. Ce dernier point impliquait pour elles de distinguer le concept de la mole de l'unité *mol* et de réaliser l'importance de nommer chaque symbole utilisé pour éviter des confusions.

En matière de connaissances didactiques et pédagogiques, les enseignantes ont exploité les acquis de la formation pour améliorer les activités. Pendant leur retour réflexif, elles mentionnaient apprécier les concepts didactiques mis à profit durant la conception du matériel didactique. Par exemple, certaines ont parlé de la dévolution créée par l'intervention par défi; elles se sont réjouies de l'aspect ludique engageant des activités. Une enseignante soulignait que « les élèves étaient très concentrés et très motivés. » (E1) En ce sens, une autre a ajouté : « Tous les groupes voulaient savoir quel était la masse d'un grain. » (E3)

Toujours dans l'idée d'illustrer les connaissances didactiques et pédagogiques acquises, les enseignantes se sont attardées sur la description des observations, réalisées en classe, au sujet des apprentissages. Elles ont remarqué que leurs choix pédagogiques et didactiques ont favorisé le développement des habiletés et des attitudes chez les élèves (manipulation avec minutie, travail en équipe, curiosité, etc.) ainsi que leur acquisition du concept. Elles ont noté que la plupart des élèves ne confondent plus les symboles ou les entités chimiques et appliquent correctement les formules en manifestant un raisonnement cohérent

Les enseignantes ne remettaient plus en question le savoir des élèves, mais ont réalisé que ces observations sont les conséquences de l'évolution de leurs propres connaissances disciplinaires (maîtrise du concept), pédagogiques (choix du matériel) et didactiques (conception de l'analogie modélisante).

Les participantes ont aussi énuméré des difficultés persistantes, plutôt d'ordre mathématique, qui étaient éprouvées par les élèves lors des activités animées en classe ou des évaluations.

Le mésocycle 5 : évaluation et réflexion

Le groupe de discussion, animé à la fin du mésocycle 5, a permis de recueillir l'opinion des enseignantes au sujet des retombées de la formation et au sujet de leurs connaissances disciplinaires et didactiques.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Le tableau 3 montre les catégories et les sous-catégories qui ont émergé durant l'analyse de la transcription.

Tableau 3
Les résultats de l'analyse de la transcription
du groupe de discussion final

Catégories	Codes	Nombre d'enseignantes
Évolution des connaissances disciplinaires	Épistémologie du concept scientifique	3
	Maitrise du concept	6
Évolution des connaissances didactiques	Identification des conceptions alternatives des élèves	6
	Enseignement avec une analogie	4
	Intervention par défi	6
	Développement des habiletés	6
	Développement des attitudes	4
	Changements dans les pratiques professionnelles	6
	Difficultés persistantes	1

Sur le plan des connaissances disciplinaires, les enseignantes se sont dites convaincues que la conception d'une séquence d'enseignement devrait commencer par une appropriation personnelle des concepts enseignés. Elles ont longtemps parlé de leur intérêt à connaître l'évolution socio-historique du concept et à s'approprier un langage correct en chimie. Trois des participantes ont mentionné que la connaissance de l'évolution socio-historique de la mole a amélioré leur compréhension du concept et leurs capacités à l'enseigner. L'une d'elles a dit : « Pour moi, tout le concept de mole a changé de sens. » (E5) Toutes les trois ont ajouté qu'elles n'avaient jamais pensé à la dualité sous-microscopique-macroscopique, un des fondements de l'enseignement de la chimie. Les trois autres participantes ont dit qu'elles ne réalisaient pas elles-mêmes leurs difficultés au sujet de l'appropriation du concept, mais qu'elles avaient de la difficulté à l'enseigner. Cet extrait de la transcription souligne ce fait : « J'ai vu que c'était bien acquis pour moi mais que mon enseignement présentait des lacunes. Je ne pensais pas à faire ce rapprochement entre micro et macro. » (E2)

Les enseignantes ont remarqué l'évolution de leurs connaissances didactiques et pédagogiques, ce dont témoignent ces deux citations :

« La formation m'a aidée à construire des analogies, à faire des liens entre les notions et aussi à ajouter des séances de laboratoire. » (E2)



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

« Je suis contente d'avoir appris comment tenir compte des différentes parties de la définition de mole pour construire la séance. »(E4)

Les participantes ont aussi parlé des acquis de la formation sur le plan didactique, comme la prise en compte des conceptions alternatives des élèves et l'utilisation des analogies modélisantes. Elles ont manifesté leur étonnement de pouvoir concrétiser un concept abstrait : « Personne n'avait imaginé qu'on pouvait aller au laboratoire pour le concept de mole. » (E1) Les enseignantes ont apprécié l'aspect ludique des activités créées dans le domaine de référence qui a amélioré les apprentissages.

Le choix des verbes dans leurs propos a différé de celui observé au mésocycle 1. Il montre un changement dans leurs choix pédagogiques et didactiques, qui sont maintenant plutôt centrés sur l'élève. Elles ont employé les verbes travailler (13 fois), assimiler (5 fois) et acquérir (2 fois) pour décrire les processus d'apprentissage des élèves.

Durant les entrevues individuelles, chaque enseignante a témoigné de son expérience dans cette recherche de type DBR. Les transcriptions ont été analysées en considérant les mêmes catégories et sous-catégories que celles présentées au tableau 3.

En examinant la fréquence des sous-catégories, dans les six transcriptions, on constate que la sous-catégorie « changements dans les pratiques professionnelles » est associée au plus grand nombre de segments de texte, soit 55. Au deuxième rang se trouve la sous-catégorie « développement pertinent du concept scientifique », associée à 32 segments de texte. Les enseignantes ont réalisé une évolution de leurs connaissances disciplinaires, didactiques et pédagogiques.

En ce qui concerne le développement des connaissances disciplinaires, les enseignantes ont répété, durant les entretiens individuels, avoir l'impression que leur savoir disciplinaire au sujet du concept de mole a évolué. Elles ont fait remarquer l'effet d'une meilleure connaissance de l'histoire du concept sur leur enseignement et plus précisément sur le choix du vocabulaire et des définitions. Voici ce qu'ont rapporté deux enseignantes en particulier :

« J'ai approfondi plusieurs repères socio-historiques à propos du concept de mole, ce qui m'a permis de préciser certaines notions et de mieux tenir compte de certaines conceptions erronées chez mes élèves. » (E2)

« Les repères culturels sont un enrichissement pour mes connaissances scientifiques. L'évolution socio-historique du concept, jusqu'à la définition récente, me pousse à bien choisir le vocabulaire à enseigner. » (E1)



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

Par ailleurs, les enseignantes ont réalisé qu'elles avaient l'habitude de surtout enseigner des algorithmes de calcul aux élèves, ce qu'elles maîtrisaient le plus du concept :

« J'ai constaté qu'avant la formation, ma fiche de préparation ne visait pas l'échelle microscopique et le lien entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique, ce qui est pourtant très important dans le cas de la mole. De plus, mon approche était plutôt mathématique, avec des formules... » (E4)

Les enseignantes ont aussi mentionné l'évolution de leurs connaissances didactiques et pédagogiques. Deux des enseignantes, E1 et E6, ont déclaré qu'elles enseignaient la mole de la même façon qu'elles l'ont apprise durant leur parcours scolaire et universitaire, soit d'une façon opératoire. L'une d'elles a précisé : « C'est ainsi qu'on m'a enseigné la mole. » (E1) Toutes les enseignantes ont encore manifesté leur enthousiasme d'avoir réussi à planifier un défi qui permettait aux élèves de saisir de manière concrète leurs connaissances, grâce à la manipulation, afin qu'ils puissent les transférer du domaine de référence au domaine cible, qui est abstrait. Elles ont critiqué les analogies qu'elles utilisaient et se sont réjouies d'être mieux outillées pour construire ou critiquer des analogies.

Les participantes ont aussi signalé que leur perception des aptitudes de leurs élèves s'est modifiée : « On peut trouver des moyens [didactique et pédagogique] pour aider les élèves, pour leur faire comprendre des concepts difficiles. » (E6) Elles ont remarqué l'efficacité de la séquence conçue sur les apprentissages, malgré certaines difficultés persistantes.

Durant ce mésocycle, les enseignantes ont témoigné de leur désir de participer à d'autres DBR pour développer des connaissances disciplinaires et didactiques, en particulier en chimie organique et en électrochimie.

Les résultats présentés témoignent d'une évolution des connaissances disciplinaires des enseignantes, qui ont confirmé à plusieurs reprises une meilleure maîtrise de la mole. Du reste, les formations animées ont permis aux participantes, selon leurs dires, de faire des choix pédagogiques et didactiques plus éclairés, entre autres par la planification d'une analogie modélisante comportant un défi et favorisant une meilleure gestion pédagogique de la classe. Le volet curriculaire a été peu abordé puisque les enseignantes connaissaient bien le curriculum.

Discussion

Le cycle de DBR a commencé par une phase d'analyse et d'exploration. Les résultats confirment que les enseignantes suivaient les



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

manuels page par page, enseignaient des algorithmes aux élèves et expliquaient l'échec de ces derniers par leur manque de logique et d'aptitudes au raisonnement. Ces représentations expliquaient que l'enseignement se moulait au model transmissif (Astolfi et al., 2008). L'importance accordée aux algorithmes mathématiques n'est pas surprenante : Moss et Pabari (2010) ont montré que lorsqu'on demande à des personnes enseignantes d'écrire en 5 minutes ce qu'elles savent du concept de mole, les textes produits comportent surtout des nombres (exemple : nombre d'Avogadro) et des formules. Ces algorithmes permettent de répondre correctement à la plupart des questions habituelles sur le concept, mais n'en garantissent en rien une compréhension réelle (Fang et al., 2016; Moss et Pabari, 2010).

Les enseignantes ont parlé de l'aspect abstrait du concept et de leurs recours à des analogies dénoncées par plusieurs chercheurs. De plus, il n'était pas surprenant que les participantes aient tendance à enseigner la mole de la même façon qu'elles l'avaient elles-mêmes apprise au secondaire (Kind et Kind, 2011) et que, durant leur formation universitaire, le concept de mole leur avait été présenté d'une manière opératoire (Furió et al., 2000).

Ces lacunes pendant leur parcours scolaire et universitaire, en lien avec l'enseignement de la mole, expliquent en partie l'incohérence observée. En effet, durant ce mésocycle, les enseignantes ont manifesté des connaissances curriculaires. Elles connaissent les progressions des apprentissages et les attentes du ministère, mais elles ne réalisent pas les exigences didactiques et pédagogiques pour assurer l'enseignement adéquat de ce concept. En se comparant aux personnes leur ayant enseigné la chimie, elles estiment bien enseigner le concept et négligent les attentes du ministère en matière de prestation d'enseignement.

En conclusion, les résultats du mésocycle 1 (au début du projet) ont confirmé trois constats : 1) les enseignantes manquent de connaissances épistémologiques et disciplinaires et ne maîtrisent que l'aspect opératoire du concept; 2) les enseignantes, faute de connaissances pédagogiques et didactiques, éprouvent des difficultés dans la planification de l'enseignement de la mole; 3) les enseignantes connaissent le curriculum, y compris la place de la mole dans la progression.

Au cours de la phase de conception, les commentaires des enseignantes tournaient surtout autour de leurs observations en classe. Elles y reconnaissaient les effets bénéfiques de leurs choix didactiques. Elles ont réussi à planifier un défi où l'élève doit comprendre le problème par lui-même, élaborer une hypothèse, manipuler des objets concrets et trouver la solution. Leur choix de substances retrouvées dans la vie quotidienne (sucre, poivre, etc.) justifie la pertinence du domaine de référence qui doit être connu par l'élève. Les enseignantes ont observé la dévolution créée à travers une activité de manipulation durant laquelle



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

l'élève s'engage dans une tâche ouverte. En outre, l'emploi de noms familiers, comme proposé par Gabel et al. (1984), s'est avéré efficace pour créer un pont avec le domaine cible, qui est la mole.

L'analogie modélisante, conçue par les enseignantes, semble s'appuyer sur la littérature scientifique et favoriser l'évolution de l'enseignement de la mole.

Il faut constater que l'expression « quantité de matière » est restée problématique et la confusion avec des variables physiques (comme la masse et le volume) n'a pas été résolue de façon satisfaisante.

Durant les rencontres du groupe de discussion final et les entretiens d'explicitation, les enseignantes ont évoqué une évolution de leurs connaissances disciplinaires et de leur enseignement. Entre le premier et le dernier mésocycle, on constate une évolution, du point de vue pédagogique, du discours des enseignantes. Au départ, elles avaient recours à un discours « spontané, subjectif et intuitif » alors que, vers la fin, leur discours était devenu plus « réfléchi, raisonné et argumenté » (Altet, 2013, p. 41). Ce développement de la pensée réflexive est souvent l'indice d'une plus grande maîtrise des connaissances disciplinaires, didactiques et pédagogiques, c'est-à-dire d'une « professionnalisation » accrue (Altet, 2013).

En réalité, tel que précisé dans le cadre théorique, cette recherche visait la reconstruction de l'enseignement en travaillant trois dimensions, celles pratique, technique et scientifique (Duit, 2007). Comme le montrent Azcona, et al. (2002), Padilla et Furió-Mas (2008) et Furió et al. (2000), la présentation de l'épistémologie et de l'évolution socio-historique du concept de la mole en a facilité l'enseignement.

La formation a développé chez les enseignantes des connaissances épistémologique et disciplinaires (le sens et les aspects du concept), mais également pédagogiques et didactiques (planification de l'analogie modélisante). Les connaissances curriculaires étaient acquises au début de la formation.

En conclusion, le DBR semble avoir eu des retombées positives sur l'évolution des connaissances professionnelles des participantes et plus particulièrement sur leurs connaissances disciplinaires et pédagogiques.

Limites de la recherche

Le petit nombre d'enseignantes de cette recherche a facilité la collaboration avec la chercheuse de même que la création de ponts entre la théorie et la pratique. Toutefois, un plus grand nombre d'enseignantes aurait formé un échantillon plus représentatif. Les résultats pourraient aussi



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

être complétés en réalisant une collecte de données auprès des élèves pour évaluer l'évolution de leurs conceptions alternatives.

Recommandations

Les résultats de cette recherche remettent en question certains profils de la formation initiale des personnes enseignantes ainsi que le lexique associé au concept de mole.

Par ailleurs, il est fortement recommandé que la formation initiale comporte un volet épistémique des concepts en sciences. Une telle formation rendrait les concepts enseignables et favoriserait un développement des connaissances professionnelles.

Aussi, une précision pourrait être ajoutée à la définition de la mole proposée durant le BIPM (2018) :

La quantité de matière ne peut être mesurée directement à l'aide d'instruments. Elle est calculée à partir de propriétés physiques comme la masse, le volume ou la concentration.

Enfin, l'expression « quantité de matière » est problématique pour les personnes enseignantes. L'expression « nombre en mole » aurait l'avantage d'être cohérente avec des consignes souvent rencontrées dans des manuels scolaires telles que « calculer en grammes », « calculer en mL », etc. Chose certaine, les chimistes et les didacticiens et didacticiennes de la chimie ont encore beaucoup de travail à faire pour que le concept de mole, et sa transposition didactique, deviennent moins ambigus.

Références

- Abou Halloun, S. et Thouin, M. (2021). La mole : évolution historique et défis de son enseignement. *Actualité chimique*, (465), 35-37.
- Altet, M. (2013). Formes de résistance des pratiques de formation d'enseignants à la pratique réflexive et conditions de développement de la réflexivité. Dans M. Altet, J. Desjardins, R. Etienne, L. Paquay, et P. Perrenoud, *Former des enseignants réflexifs. Obstacles et résistances. Obstacles et résistances*. Bruxelles: De Boeck.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y. et Toussaint, J. (2008). *Les mots clés de la didactique: repères, définitions, bibliographies*. De Boeck.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

- Azcona, R., Furió-Mas, C. et Guisasola, J. (2002). Algunas reflexiones sobre la magnitud cantidad de sustancia y su unidad el mol: implicaciones para su enseñanza. *Anales de la Real sociedad Española de Química*, (3), 30-33.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance*. Vrin.
- Bannan-Ritland, B. et Baek, J (2008). Investigating the act of design in design research: the road taken. Dans A. Kelly, R. Lesh, et J. Baek, *Handbook of design research methods in education Innovations in science, Technology, Engineering, and Mathematics Learning and Teaching*. Routledge.
- Barab, S. et Squire, K. (2004) Design-based research: Putting a stake in the ground, *The Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 1-14. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1301_1
- Barański, A. (2012). The atomic mass unit, the Avogadro constant, and the mole: a way to understanding. *Journal of Chemical Education*, 89(1), 97-102. <https://doi.org/10.1021/ed2001957>
- Barlet, R. et Plouin, D. (1997). La dualité microscopique-macroscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire. *Aster: Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 25(1), 143-174
- Boilevin, J.-M. (2013). *Rénovation de l'enseignement des sciences physiques et formation des enseignants. Regards didactique*. De Boeck.
- Bou Jaoudé, S. et Barakat, H. (2003). Student's problem solving strategies on stoichiometry and their relationships to conceptual understandings and learning approaches. *Electronic Journal of Science Education*, 7(3), 1-42
- Brown, A. L. (1992). Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The Journal of The Learning Sciences*, 2(2), 141-178.
- Cauzinille-Marmèche, E., Mathieu, J. et Weil-Barais A. (1985). Raisonement analogique et résolution de problèmes. *L'année psychologique*, 85(1), 49-72
- Collins, A. (1992). Toward a design science of education. Dans E. Scanlon et T. O'Shea (dir.), *New directions in educational technology* (p. 15-22). Springer-Verlag.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

- CGPM. *Comptes rendus des séances de la vingt-sixième Conférence Générale des poids et des mesures (2018). Résolution 1*, BIPM. <https://www.bipm.org/fr/committees/cg/cgpm/26-2018>
- Duit, R. (2007). Science education research internationally: conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 3(1), 3-15.
- Dupin, J.-J. et Joshua, S. (1994). Analogie et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, 3(1), 9-26.
- Fang, S.-C., Hart, C. et Clarke, D. (2016). Identifying the critical components for a conceptual understanding of the mole in secondary science classrooms. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(2), 181-214.
- Furió, C., Azcona, R., Guisasola, J. et Ratcliffe, M. (2000). Difficulties in teaching the concepts of « amount of substance » and « mole ». *International Journal of Science Education*, 22(12), 1285-1304
- Furió-Mas, C., Azcona, R. et Guisasola Aranzábal, J. (2002). The learning and teaching of the concepts « amount of substance » and « mole »: a review of the literature. *Chemistry Education: Research and Practice*, 3(3), 277-292.
- Gabel, D. L., Sherwood, R. D. et Enochs, L. (1984). Problem-solving skills of high school chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, 21(2), 221-233.
- Glynn, S. (2007). The teaching-with-analogies model. Dans K. D. Muth, *Children's Comprehension of Text* (p. 185-204) International Reading Association. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED304672.pdf#page=195>
- Gorin, G. (1982). « Chemical Amount » or « Chemiance »: Proposed names for the quantity measured in mole units. *Journal of Chemical Education*, 59(6), 508. <https://doi.org/10.1021/ed059p508>
- Herron, J. D. (1975). Piaget for chemists. Explaining what « good » students cannot understand. *Journal of Chemical Education*, 52(3), 146. <https://doi.org/10.1021/ed052p146>
- Heywood, D. et Parker, J. (2009). The role of analogies in learning. Dans D. Heywood et J. Parker, *The Pedagogy of Physical Science* (p. 39-64). Springer.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701-705
- Kind, V. et Kind, P. M. (2011). Beginning to teach Chemistry: How personal and academic characteristics of pre-service science teachers compare with their understandings of basic chemical ideas. *International Journal of Science Education*, 33(15), 2123-2158.
- Kolb, D. (1978). The Mole. *Journal of Chemical Education*, 55(11), 728.
- Levy Nahum, T., Hofstein, A., Mamlok-Naaman, R. et Bar-dov, Z. (2004). Can final examinations amplify students' misconceptions in chemistry? *Chemistry Education : Research and Practice*, 5(3), 301-325.
- Martinand, J-L. (1996). Introduction à la modélisation. Dans *Actes du séminaire des didactiques des disciplines technologiques*, 1-12.
- Mckenney, S. et Reeves, T. (2012). *Conducting educational design research*. Routledge.
- Meyer, J. et Land, R. (2006). *Overcoming barriers to student understanding: Threshold concepts and troublesome knowledge*. Routledge.
- Moss, K. et Pabari, A. (2010). The mole misunderstood. *New Directions in the Teaching of Physical Sciences*, (6), 77-86.
- Nelson, P. G. (1991). The elusive mole. *Education in Chemistry*, 28(4) 103-104
- Ney, M. (2006). Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie. *ASTER*, 43(1), 133-162.
- Padilla, K. et Furio-Mas, C. (2008). The importance of history and philosophy of science in correcting distorted views of « amount of substance » and « mole » concepts in chemistry teaching. *Science et Education*, 17(4), 403-424.
- Pekdağ, B. et Azizoğlu, N. (2013). Semantic mistakes and didactic difficulties in teaching the “amount of substance” concept: a useful model. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(1), 117-129.
- Rocha-Filho, R. C. (1990). A Proposition about the quantity of which mole is the SI unit. *Journal of Chemical Education*, 67(2), 139-140.



REVUE HYBRIDE DE L'ÉDUCATION

- Sarantopoulos, P. et Tsapalis, G. (2004). Analogies in chemistry teaching as a means of attainment of cognitive and affective objectives: a longitudinal study in a naturalistic setting, using analogies with a strong social content. *Chemistry Education Research and Practice*, 5(1), 33-50.
- Schmidt-Rohr, K. (2020). Analysis of two definitions of the mole that are in simultaneous use, and their surprising consequences. *Journal of chemical education*, 97(3), 597-602.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational researcher*, 15(2), 4-14
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156-168.
- Thouin, M. et Abou Halloun, S. (2023). *Enseigner les sciences et les technologies au secondaire*. Éditions JFD.
- Vogel, D. (1992). Atomless chemistry? Why scientists believe what they cannot actually see. *The Science Teacher*, 56(8), 32-35.