

Université de Montréal

**Impact d'une formation collaborative donnée
à des enseignants de chimie du secondaire
sur l'enseignement et l'apprentissage du concept de mole**

par :

Simone Abou Halloun

**Département de Didactique
Faculté des sciences de l'éducation**

**Thèse présentée à la Faculté des sciences de l'éducation
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D)
en Sciences de l'éducation
Option didactique**

Novembre 2019

© Simone Abou Halloun 2019

Résumé

Faute de connaissances épistémologiques et socio-historiques au sujet du concept de mole et d'une transposition didactique pertinente de ce concept dans les manuels scolaires, les enseignants ne disposent pas des moyens nécessaires pour que leur enseignement soit aussi efficace qu'ils le souhaiteraient. Plusieurs recherches confirment que cet enseignement met habituellement l'accent sur l'aspect quantitatif de ce concept, néglige ses aspects qualitatifs et ne tient pas toujours compte des trois domaines du savoir en chimie : sous-microscopique, macroscopique et symbolique.

L'évolution socio-historique de la mole est complexe. En 1900, Ostwald définit la mole comme étant une « masse normale ». En 1961, on reconnaît la mole comme étant un concept pour compter les entités sous-microscopiques. En 1971, la mole devient l'unité de la « quantité de matière », sans toutefois que cela soit clairement mentionné dans la définition. Les diverses définitions qui se sont succédées laissent donc l'enseignant perplexe devant le choix d'une définition adéquate. De plus, les confusions linguistiques liées à l'apprentissage de la mole sont nombreuses, telles que des confusions phonétiques (mol et molécule), et des confusions symboliques (n, m, M, N. etc.).

Un enseignement de la mole qui ne tient pas compte de ses aspects qualitatif et quantitatif, de l'évolution socio-historique du concept et d'un évitement des erreurs sémantiques risque de provoquer des obstacles didactiques chez les élèves. Par conséquent, l'objectif général de cette recherche de développement était d'étudier l'impact d'une formation portant sur le concept de mole donnée à des enseignants du secondaire sur l'évolution de leurs connaissances et compétences professionnelles et sur la réduction des obstacles didactiques chez les élèves.

La formation a été planifiée selon un cycle de DBR (*Design Based Research*) qui comportait de nombreuses interactions entre l'étudiante-chercheuse et les six enseignantes participantes d'une école du Liban. Ce cycle de DBR se subdivisait en cinq méso cycles dans chacun desquels l'étudiante-chercheuse animait des activités de perfectionnement. Le premier mésocycle consistait essentiellement en un microcycle d'analyse et d'exploration ; les 2^e, 3^e et 4^e cycles comportent des microcycles de design et de conception de matériel didactique ainsi

que des microcycles d'analyse, d'exploration, d'évaluation et de réflexion ; le dernier mésocycle consistait surtout en un microcycle d'évaluation et d'exploration.

Durant le premier méso cycle, l'analyse des données recueillies lors d'un groupe de discussion, d'une analyse de fiches de préparation et d'une évaluation diagnostique des apprentissages a confirmé la problématique décrite ci-dessus.

Durant les trois méso cycles suivants (2^e, 3^e et 4^e), un matériel didactique a été élaboré et mis à l'essai en classe. Chacun de ces méso cycles commençait par un retour réflexif des enseignantes ayant expérimenté le matériel didactique en classe. Par la suite, une activité de perfectionnement de synthèse était animée par l'étudiante-chercheure, une amélioration du matériel d'équipe était effectuée en équipe et une mise à l'essai par des enseignantes était réalisée en classe. Chaque mésocycle se terminait par une évaluation des résultats des élèves.

Durant le dernier méso cycle, l'étudiante-chercheure a animé un groupe de discussion et des entretiens d'explicitation durant lequel les enseignantes participantes ont partagé leurs impressions au sujet des effets de la formation sur leur enseignement et sur les apprentissages des élèves.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus semblent montrer des effets positifs sur l'évolution des connaissances et des compétences professionnelles des enseignantes et sur la réduction des obstacles didactiques chez les élèves. Cette recherche présentait néanmoins d'assez nombreuses limites, notamment en raison du petit nombre d'enseignantes participantes.

Mots clés : la mole - les obstacles didactiques - les connaissances professionnelles - le *Design Based Research*

Abstract

In the absence of epistemological and socio-historical knowledge about the concept of mole and of a relevant didactic transposition of this concept in textbooks, teachers do not have the means to make their teaching as effective as they would like. Several studies confirm that this teaching usually emphasizes the quantitative aspect of this concept, neglects its qualitative aspects and does not always take into account the three areas of knowledge in chemistry: sub-microscopic, macroscopic and symbolic.

The socio-historical evolution of the mole is complex. In 1900, Ostwald defined the mole as a "normal mass". In 1961, the mole was recognized as a concept for counting sub-microscopic entities. In 1971, the mole became the unit of the "quantity of substance", however without this being clearly mentioned in the definition. These various definitions leave the teacher puzzled and looking for an adequate definition. In addition, there are many linguistic confusions related to the learning of the mole, such as phonetic confusions (mol and molecule), and symbolic confusions (n, m, M, N, etc.).

A teaching of the mole that does not take into account its qualitative and quantitative aspects, the socio-historical evolution of the concept and an avoidance of semantic errors may cause didactic obstacles for secondary school students. Therefore, the general objective of this development research was to study the impact of a training on the concept of mole given to secondary school teachers on the evolution of their professional knowledge and skills and on the reduction of didactic barriers in secondary school students.

The training was planned according to a DBR (Design Based Research) cycle which involved numerous interactions between the student-researcher and the six participating teachers from a Lebanese school. This DBR cycle was subdivided into five meso-cycles in each of which the student-researcher conducted developmental activities. The first meso-cycle consisted essentially of a microcycle of analysis and exploration ; the 2nd, 3rd and 4th cycles include microcycles of design of didactic materials as well as microcycles of analysis and exploration, evaluation and reflection ; the last meso-cycle consisted mainly of a microcycle of evaluation and exploration.

During the first meso-cycle, an analysis of the data collected during a focus group, an analysis of the preparation documents and a diagnostic assessment of learning confirmed the problem described above.

During the following three meso-cycles (2nd, 3rd and 4th), a didactic material was developed and tested in class. Each of these meso-cycles began with a reflexive feedback from the teachers who had experienced the didactic material in class. Subsequently, a synthesis development activity was facilitated by the student-researcher, an improvement of the team material was carried out by the teachers and a test was conducted in class. Each meso-cycle ended with an assessment of the secondary school students' achievement.

During the last meso-cycle, the student-researcher facilitated a focus group and explanatory interviews during which the participating teachers shared their impressions about the effects of the training on their teaching and on student learning.

The analysis and interpretation of the results obtained seem to show positive effects on the evolution of teachers' professional knowledge and skills and on the reduction of didactic obstacles for secondary school students. Nevertheless, this research had quite a few limitations, mainly because of the small number of participating teachers.

Key words: Mole - Didactic Obstacles - Professional Knowledge - Design Based Research

Remerciements

Je tiens à remercier Marcel THOUIN, professeur titulaire à la faculté des sciences de l'éducation de l'université de Montréal (département de didactique), qui m'a encadré tout au long de cette thèse avec professionnalisme et qui m'a transmis sa passion contagieuse de la didactique des sciences.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Remerciements.....	v
Table des sigles.....	ix
Introduction.....	1
1 Problématique	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Le triangle didactique	3
1.3 Les sciences à l'école.....	5
1.3.1 Développer une culture scientifique et technologique.....	5
1.3.2 Distinguer l'enseignement et l'apprentissage	6
1.3.3 Acquérir des connaissances et des savoirs en sciences.....	7
1.4 Les difficultés d'apprentissage en chimie.....	9
1.4.1 Les conceptions et les obstacles.....	9
1.4.2 Le langage scientifique.	11
1.4.3 Les domaines du savoir en chimie.....	13
1.5 Les difficultés d'apprentissage du concept de mole et de l'unité du SI qui lui sont associées	14
1.5.1 Les obstacles épistémologiques relatifs au concept de mole	14
1.5.2 Les obstacles didactiques relatifs au concept de mole.....	15
1.5.3 Les obstacles d'apprentissage dus au concept de mole	17
1.6 Les manuels scolaires de chimie.....	19
1.6.1 Les programmes de sciences et de technologie	19
1.6.2 Les savoirs dans les manuels scolaires	20

1.6.3	Le concept de mole dans les manuels scolaires	21
1.7	Les difficultés de l'enseignement des sciences.....	24
1.7.1	Les représentations des enseignants et les approches constructivistes	25
1.7.2	Les pratiques d'enseignement.....	26
1.7.3	L'enseignement du concept de mole.....	27
1.8	La formation des enseignants	29
1.8.1	Les connaissances en acte des enseignants.....	30
1.8.2	Des dispositifs de formation pour le développement des pratiques professionnelles	32
1.9	La pertinence scientifique et sociale de la recherche.....	35
1.10	L'objectif général de recherche	36
2	Cadre théorique	37
2.1	Introduction.....	37
2.2	L'apprentissage des sciences, de la chimie et du concept de mole	37
2.2.1	L'apprentissage des sciences	38
2.2.2	L'apprentissage de la chimie	41
2.2.3	Le concept de mole	49
2.2.4	Le changement conceptuel.....	60
2.3	L'enseignement des sciences, de la chimie et du concept de mole	62
2.3.1	Réussir un programme centré sur l'apprentissage.	63
2.3.2	La transposition didactique.....	73
2.3.3	L'enseignement de la mole	77
2.3.4	Analyse didactique du contenu	79
2.4	Le développement professionnel des enseignants	85
2.4.1	L'effet- maitre.....	85
2.4.2	La pratique enseignante	86

2.4.3	L'épistémologie de l'enseignant.....	87
2.4.4	Les conceptions naïves des enseignants	89
2.4.5	Le modèle pédagogique de l'enseignant.....	90
2.4.6	Les connaissances professionnelles	91
2.4.7	La formation des enseignants.....	95
2.4.8	Le modèle de la formation	98
2.5	Les objectifs spécifiques de la recherche.....	102
3	Méthodologie.	103
3.1	Definition du <i>Design Research</i>	103
3.2	Le <i>Design Based Research</i>	105
3.3	Les caractéristiques d'une recherche de type DBR	107
3.3.1	Une contribution à des principes.....	108
3.3.2	La base de données du DBR	109
3.3.3	Le développement professionnel des enseignants	110
3.4	Les phases du DBR.....	111
3.5	Les critères de scientificité du DBR	116
3.6	Les défis du DBR.....	117
3.7	Un rappel du modèle de la formation	118
3.8	Le déroulement global de la formation.....	120
3.9	Le déroulement du cycle DBR	122
3.9.1	Le mésocycle (1) : Analyse et exploration	123
3.9.2	Le mésocycle (2) : Conception de matériel didactique.....	123
3.9.3	Le mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique.....	123
3.9.4	Le mésocycle (4) : Suite de l'amélioration du matériel didactique	124
3.9.5	Le mésocycle (5) : Impact de la formation	124
3.10	Les outils de collecte des données	126

3.10.1	Le groupe de discussion.....	126
3.10.2	Le test.....	128
3.10.3	L’entrevue individuelle.....	128
3.10.4	L’analyse de documents.....	129
4	Présentation et analyse des résultats	131
4.1	Rappel sur le déroulement global de la formation.....	131
4.2	Le déroulement de chacun des mésocycles	131
4.2.1	Le mésocycle (1) : Analyse et exploration	131
4.2.2	Le mésocycle (2) : Conception de matériel didactique.....	133
4.2.3	Le mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique.....	134
4.2.4	Mésocycle (4) : Suite de l’amélioration du matériel didactique	134
4.2.5	Le mésocycle (5) : Impact de la formation	136
4.3	Les résultats du mésocycle (1) : Analyse et exploration	146
4.3.1	Le groupe de discussion.....	146
4.3.2	Les fiches de préparation	152
4.3.3	L’évaluation diagnostique (Annexe 6).....	154
4.4	Les résultats des trois mésocycles visant la conception et l’amélioration du matériel didactique.....	156
4.4.1	Les résultats du mésocycle (2) : Conception du matériel didactique.....	156
4.4.2	Les résultats du mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique.....	158
4.4.3	Les résultats du mésocycle (4) : Suite de l’amélioration du matériel didactique	161
4.4.4	Le retour réflexif des enseignantes	162
4.4.5	Les résultats des élèves	166
4.5	Les résultats du dernier mésocycle (fin du DBR).....	179

4.5.1	Le groupe de discussion.....	179
4.5.2	Les entrevues individuelles.....	187
5	Interprétation et discussion des résultats.....	192
5.1	Le mésocycle (1) : Analyse et exploration	192
5.2	Les mésocycles (2), (3) et (4) : Conception et amélioration du matériel didactique.....	194
5.3	Le mésocycle (5) : Impact de la formation.....	197
5.4	Retour sur les objectifs de la recherche	198
6	Conclusion.....	201
6.1	Résumé de la recherche	201
6.2	Les limites de cette recherche.....	203
6.3	Les recommandations	204
	Bibliographie.....	i
	ANNEXES.....	xxi
	Annexe 1 : Le certificat d'éthique de la recherche	xxii
	Annexe 2 : La mole un concept nœud.....	xxxii
	Annexe 3 : La transposition du concept de mole dans les manuels scolaires	xxxiii
	Annexe 4 : Guide de discussion du groupe de discussion (phase d'analyse et d'exploration).....	li
	Annexe 5 : Grille d'analyse des fiches de préparation.....	liv
	Annexe 6 : L'évaluation diagnostique	lxi
	Annexe 7 : Guide de discussion des retours réflexifs des enseignantes	lxx
	Annexe 8 : Les évaluations formatives	lxxi
	Annexe 9 : Le matériel didactique créé.....	lxxiii
	Annexe 10 : Guide de discussion du groupe de discussion (Phase d'évaluation et de réflexion).....	ciii
	Annexe 11 : Guide de discussion de l'entrevue individuelle.....	civ

Table des tableaux

Tableau 1 : L'évolution socio-historique du concept de mole, source d'obstacles épistémologiques et didactiques.	58
Tableau 2 : Méthode de modélisation analyse-synthèse (Crête et Imbeau, 1996).....	69
Tableau 3 : Analyse didactique du contenu	84
Tableau 4 : Les trajets de la formation (inspiré des travaux de Dunod, 1983, dans Astolfi et al., 2008).....	91
Tableau 5 : Le profil des enseignantes participantes	120
Tableau 7 : Les catégories et les sous-catégories qui ont émergé de l'analyse qualitative du groupe de discussion de la phase d'analyse et d'exploration	147
Tableau 8 : Les ressemblances entre le domaine de référence et le domaine cible de l'analogie utilisée.	158
Tableau 9 : Les catégories et les codes de l'analyse qualitative des retours des enseignantes	163
Tableau 10 : Des exemples des énoncés construits par les élèves.....	177
Tableau 11 : Les résultats de l'analyse du verbatim du groupe de discussion final.	181
Tableau 12 : Les résultats de l'analyse qualitative du groupe de discussion final	186

Table des figures

Figure 1 : Iceberg des conceptions (Giordan et Pellaud, 2004, p.49).....	45
Figure 2 : Les trois phases d'une séquence d'enseignement (Noverraz, 2007, p.6).....	65
Figure 3 : Les trois registres de la modélisation (Martinand, 1996, 2010).....	70
Figure 4 : Le processus de la transposition didactique	75
Figure 5 : La carte conceptuelle de la mole (Fang, Hart et Clarke, 2014, p. 354 / 2016, p. 186)	78
Figure 6 : La discipline de formation des enseignants (Martinand, 1993, p. 97)	97

Figure 7 : Le modèle de la formation adoptée au cours du cycle DBR	101
Figure 8 : L'efficacité des innovations du design based sur les pratiques professionnelles et les apprentissages. (Schwartz, Chang et Martin, 2008, p.56)	105
Figure 9 : Créer les ponts entre les deux communautés de praticiens dans le DBR (Steinberg et al., 2014, p.1401)	106
Figure 10 : Le cycle de vie de la DBR (Steinberg et al., 2014, p.1402).....	112
Figure 11 : Micro, méso et macro cycles (Mckenney et Reeves, 2012, p. 78).....	113
Figure 12 : La modélisation du macrocycle de DBR.....	125
Figure 13 : L'équation ($n=m/M$) de la mole dans un triangle.....	149
Figure 14 : Des exemples de représentations des élèves d'un grain de sable.....	176

Table des histogrammes

Histogramme 1 : Histogramme représentant la répartition des sous-catégories de l'analyse du groupe de discussion de la phase d'analyse et d'exploration.	148
Histogramme 2 : Les résultats de l'analyse des réponses des élèves à l'évaluation diagnostique.	155
Histogramme 3 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour le calcul de nombre en mole à partir d'une masse d'un échantillon	168
Histogramme 4 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour le calcul de nombre d'atomes à partir d'un nombre en mole d'atomes	169
Histogramme 5 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour le calcul de nombre de molécules à partir d'un nombre en mole de molécules.....	170
Histogramme 6 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour la résolution d'une tâche complexe	171
Histogramme 7 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR sur les confusions langagières du concept « quantité de matière ».	172

Histogramme 8 : Les résultats de l'analyse des réponses des élèves à l'exercice « le grain de sable »	175
Histogramme 9 : Les résultats de l'analyse des énoncés construits et corrigés par les élèves	178
Histogramme 10 : Histogramme représentant la répartition des sous-catégories dans l'analyse du groupe de discussion (phase de l'analyse et de l'évaluation).	185

Table des matrices des fréquence

Matrice des fréquences 1 : Matrice des fréquences des sous-catégories de l'analyse des retours réflexifs des enseignantes au début de chaque mésocycle.	165
--	-----

Table des dendrogrammes

Dendrogramme 1 : Co-occurrence des sous-catégories de l'analyse des retours réflexifs des enseignantes au début de chaque mésocycle.	165
Dendrogramme 2 : Co-occurrence des sous-catégories de l'analyse qualitative des verbatim des entretiens d'explicitations.	186

Table des sigles

ADDIE	: Analysis, Design, Development, Implementation et Evaluation
BIPM	: Bureau international des poids et mesures
CGPM	: General Conference on Weights and Measures
CoP	: Communautés des praticiens
CRDP	: Centre de Recherche et de Développement Pédagogique du ministère de l'éducation au Liban
CTLP	: Chemical Thinking Learning Progression
DBR	: Design Based Research
DTD	: Délai de transposition didactique
DTDm	: Délai de transposition didactique dans les manuels scolaires
DTDp	: Délai de transposition didactique dans les programmes scolaires
EB-9	: Éducation de base 9 ^e année (Équivalent de la classe de troisième dans le système français et secondaire 4 dans le système québécois)
INRP	: Institut national de recherche pédagogique
IREM	: Instituts de recherche sur l'enseignement des mathématiques
ISO	: Organisation internationale de normalisation
LIREST	: Laboratoire interuniversitaire de recherche en éducation scientifique et technologique
LPCK	: Local Pedagogical Content Knowledge
OCDE	: Organisation de coopération et de développement économique
NRC	: National Research Council
PCK	: Pedagogical Content Knowledge
PISA	: Programme international pour le suivi des acquis des élèves
UICPA	: Union internationale de chimie pure et appliquée
UIPPA	: Union internationale de physique pure appliquée
SI	: Système international d'unités

Introduction

« Le nombre est le principe-clé qui mène vers la sagesse » convenait Nicolas de Cues au XV^e siècle. Si les nombres constituent l'essentiel du langage mathématique, leur maîtrise est fondamentale dans tous les domaines des sciences et des technologies. La chimie est une des sciences qui doit sa naissance aux nombres. Elle est apparue quand les alchimistes ont abandonné les pratiques brouillées par « le langage et le symbolisme ésotériques » (Levy, 2015) et ont intégré les dosages quantitatifs dans leurs préparations. La chimie est vite devenue la science qui se traduit par des nombres : le nombre des particules élémentaires de l'atome, les masses, les constantes, etc.

La représentation du monde microscopique et sous-microscopique caractéristique de la chimie a impliqué des nombres inaccessibles dont le plus grand : le nombre d'Avogadro. « L'immensité [de ce nombre] met en valeur la taille infinitésimale de l'atome » (Levy, 2015, p. 169). Ce monde, décrit par des symboles et des modèles, rend la chimie abstraite et énigmatique. Relier ce monde sous-microscopique au monde macroscopique en fondant un savoir pertinent est un défi constant de l'enseignement et de l'apprentissage de cette science.

L'apprentissage de la chimie commence dans les classes du secondaire où sont présentés des concepts et des théories décrivant un monde en bonne partie invisible qui laisse libre cours à l'imagination de l'élève pour créer ses propres représentations. Et comme les concepts sont inter-reliés et enchevêtrés, parfois même mêlés à d'autres disciplines, l'élève finit par créer son propre répertoire de conceptions alternatives qui s'écarte du répertoire scientifique. Ainsi se construisent des connaissances inadéquates par rapport au savoir savant. Ces conceptions réduisent l'efficacité du raisonnement scientifique de l'élève et peuvent même devenir des obstacles insurmontables à son parcours d'apprentissage de la chimie.

Les conceptions alternatives et les obstacles à l'apprentissage constituent un volet important des recherches en didactique : certaines visent à les identifier et à les répertorier selon leurs origines et leur discipline, alors que d'autres traitent des modèles de changement conceptuel. Les recherches en didactique des sciences montrent également une grande concordance entre les conceptions alternatives des élèves et celles des enseignants. Certaines recherches confirment aussi l'origine didactique de certains obstacles : les méthodes

d'enseignement, le matériel didactique, les connaissances professionnelles de l'enseignant et l'effet-maitre sont ainsi remis en question.

Les résultats des recherches en pédagogie et en didactique confirment que les pratiques enseignantes sont influencées par la formation initiale de l'enseignant, son expérience professionnelle et sa personnalité. Par ailleurs, durant de longues années, les résultats des recherches en didactique ne furent pas réinvestis dans les classes car les enseignants et les chercheurs se retrouvaient dans deux communautés qui n'interagissaient pas entre elles. Ce fossé entre les préoccupations des chercheurs et les pratiques des enseignants ne favorisait pas une évolution des méthodes d'enseignement. C'est ainsi que de nouvelles méthodologies de recherche visent à créer un pont entre la communauté des enseignants et celle des chercheurs pour les inciter à collaborer et à coopérer ensemble. Ces démarches de recherche réussissent à répondre aux besoins du milieu scolaire en jumelant l'expertise pratique de l'enseignant au savoir plus théorique du chercheur.

C'est dans cette approche de concertation chercheur-enseignants que la présente recherche a été menée auprès d'enseignants libanais du secondaire ; les acteurs ont été amenés à interagir pour construire une séquence d'enseignement et d'apprentissage du concept de mole qui visait à réduire les obstacles didactiques chez les élèves. De façon plus générale, les effets de cette coopération sur le développement professionnel des enseignants et la réduction des obstacles didactiques chez les élèves ont été étudiés.

Cette thèse comporte : 1) Une problématique qui présente les difficultés d'enseignement et d'apprentissage des sciences, de la chimie et plus particulièrement du concept de mole et qui explicite aussi les enjeux des formations destinées à des enseignants. 2) Un cadre théorique dont la littérature scientifique permet de saisir les nombreuses embuches relatives à l'enseignement du concept de mole, de déterminer les caractéristiques d'un d'apprentissage efficace de ce concept, et d'explorer les dispositifs de formation qui permettent à l'enseignant de développer ses connaissances et ses compétences professionnelles. 3) Une méthodologie qui décrit la méthode de recherche retenue, le *Design Based Research*, ainsi que les outils de collecte des données. 4) Une présentation et une interprétation des résultats où les données recueillies sont présentées et interprétées à la lumière de la littérature scientifique pour répondre aux questions de la recherche. 5) Une conclusion qui résume la recherche, en présente les limites, et propose certaines recommandations.

1 Problématique

1.1 Introduction

L'enseignement des sciences et des technologies au secondaire et, dans le cas de cette recherche, l'enseignement de la chimie et plus particulièrement du concept de mole, posent de nombreux problèmes.

La problématique de cette recherche, qui situe d'abord ces problèmes dans le triangle didactique, en fait un rapide survol sous l'angle de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences en général, des difficultés d'apprentissage, des manuels scolaires, des difficultés particulières de l'enseignement de la chimie et du concept de mole, ainsi que de la formation des enseignants.

Cette problématique se termine par une présentation de la pertinence scientifique et sociale de cette recherche, puis énonce l'objectif général de la recherche qui porte principalement sur l'impact d'une formation donnée à des enseignants sur l'enseignement et l'apprentissage du concept de mole.

1.2 Le triangle didactique

Selon le dictionnaire Larousse (2014), le mot didactique utilisé en tant qu'adjectif signifie : « ce qui vise à instruire, à informer et à enseigner ». Legendre (2005, p. 403), précise que la didactique est une « discipline éducationnelle dont l'objet est la planification, le contrôle et la régulation de la situation pédagogique ». Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel et Toussaint (2008) considèrent que cet adjectif caractérise un mouvement de constitution de nouveaux champs d'étude et d'analyse des phénomènes d'enseignement et d'apprentissage, en rapport avec des savoirs bien spécifiés. Le mot « didactique », en tant que nom féminin, désigne la science qui s'intéresse aux méthodes d'enseignement (Larousse, 2014) ou, comme le définit Brousseau (1997), « la science des conditions spécifiques de la diffusion [des savoirs] entre les hommes ou les institutions humaines ». Duit (2007) affirme que la didactique (« *Didaktik* ») s'intéresse à l'analyse des méthodes d'enseignement, aux transformations subies par le savoir

pour être enseigné et au développement de la personnalité de l'élève (« *Bildung* »). La didactique se préoccupe donc de l'instruction et de la construction du savoir de, et par, l'élève et se distingue ainsi de la pédagogie par l'accent placé sur l'épistémologie génétique et la psychologie cognitive (Thouin, 2017a). Dans ce processus de construction du savoir, Astolfi et Develay (1989) distinguent deux volets de la didactique : le volet théorique et le volet pratique. Alors que le volet théorique analyse et interprète des processus d'enseignement et d'apprentissage, le volet pratique conçoit et pilote des séances d'enseignement et d'apprentissage. Ces deux volets traitent notamment des conceptions des élèves qui sont des difficultés « intrinsèques aux savoirs » (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel et Toussaint, 2008, p. 5).

Par conséquent, les recherches en didactique investissent particulièrement trois domaines : 1) le rapport de l'enseignant au savoir (transposition didactique) ; 2) le rapport de l'élève au savoir (démarche didactique) ; 3) le rapport de l'enseignant à l'élève (contrat didactique). Le rapport de l'enseignant au savoir dépend de ses connaissances disciplinaires et professionnelles et détermine l'efficacité de son enseignement. Le rapport de l'élève au savoir évolue en fonction des changements conceptuels vécus et des processus cognitifs développés durant son apprentissage. Le rapport de l'enseignant à l'élève est constitué du rôle de chacun des acteurs et des attentes implicites au cours d'une séance d'enseignement et d'apprentissage.

Boilevin (2013) relève l'importance d'explicitier les conceptions alternatives et les processus d'apprentissage des élèves et de former les enseignants au sujet des démarches didactiques pour garantir le minimum d'écart possible entre le savoir savant et le savoir enseigné. Les recherches en didactique contribuent donc à concevoir et à installer des dispositifs pour faire construire le nouveau savoir par l'élève (Astolfi et Develay, 1989).

Astolfi (2014) met l'accent sur une didactique sacrifiée aux dépens de la pédagogie et sur un contenu de savoir simplifié au point de risquer d'avoir « moins d'école dans l'école » (p. 16). Cet obscurcissement du savoir rend l'enseignement, et particulièrement l'enseignement des sciences, difficile à gérer.

1.3 Les sciences à l'école

Les sciences visent à explorer, à décrire, à expliquer et à prédire des réalités et des phénomènes du monde matériel et du monde vivant ainsi qu'à développer des outils, des instruments ou des méthodes et à unifier les savoirs issus des différentes recherches (Thouin, 2017b). L'enseignement des sciences cherche à développer chez l'élève des habiletés telles que observer, classer, formuler des hypothèses et expérimenter ainsi que des attitudes de curiosité, de minutie, de précision d'esprit critique et de respect de l'environnement (Thouin, 2017a). L'élève peut ainsi acquérir une culture scientifique et technologique qui est essentielle dans un monde en constante mutation (Conseil de la science et de la technologie, 2004).

1.3.1 Développer une culture scientifique et technologique

Dans la plupart des pays du monde, les finalités de l'enseignement des sciences physiques sont de contribuer à la compréhension du monde matériel, à l'acquisition d'une culture scientifique et technologique adaptée à l'évolution de la société actuelle et à la familiarisation avec les carrières dans les domaines scientifiques et techniques. Ces finalités permettent de pressentir la nécessité d'établir des liens entre le savoir scientifique et les pratiques sociales (Buty et Plantin, 2008; Douaire, 2004).

Le Liban est un pays francophone qui a adopté ces finalités pour l'enseignement des sciences. Dans le programme d'études, elles se retrouvent dans les objectifs généraux et les compétences¹.

Malheureusement, le développement d'une culture scientifique et technologique laisse à désirer dans tous les pays, y compris les pays francophones. Par exemple, un échantillon représentatif de la population des adultes québécois obtient un résultat de 62% à un test portant sur des connaissances de base en sciences et en technologies (Conseil de la science et de la technologie, 2004). Au Liban, les résultats ne sont pas encourageants non plus, puisque les résultats des élèves libanais du secondaire aux différentes évaluations internationales sont très inférieurs à la moyenne et se situent parmi les derniers. Le Liban s'est classé 65^e, sur 70 pays,

¹ Trouvé sur le site du Centre de Recherche et de Développement Pédagogique du ministère de l'Éducation au Liban (CRDP) : <https://www.crdp.org/curr-content-desc?id=24>

aux résultats du PISA (Programme international pour le suivi des acquis des élèves) de 2016 portant sur la lecture, les mathématiques et les sciences.

De plus, les résultats de certaines études montrent une désaffection des élèves envers les sciences et les technologies dans un très grand nombre de pays, incluant le Liban. Bien qu'ils montrent une curiosité vis-à-vis des sciences, « une baisse de l'appétence des jeunes pour les études scientifiques » est remarquée (Projet Sophia, 2009, p.48). Les jeunes semblent en effet plus attirés par des domaines plus populaires ou utilitaires, tels que la communication, les arts de la scène ou l'informatique. C'est surtout vers la fin du secondaire (ou, selon le système français, la classe de troisième) que ces préférences commencent à se manifester (Sarmant, 2001).

Les raisons de ce désintérêt pour les sciences pourraient être dues au fait que plusieurs élèves possèdent une vision naïve et stéréotypée des chercheurs scientifiques. Ils considèrent les sciences comme une discipline qui ne concerne que l'élite et les chercheurs comme des personnes isolées et peu sociables (Vilches et Gil-Pérez, 2012). Ces représentations, si elles étaient mieux connues des enseignants de sciences, pourraient les inciter à remettre en question les pratiques qui ne favorisent pas l'appropriation du sens des concepts scientifiques et ne stimulent pas un réel intérêt pour l'apprentissage dans ce domaine (Vilches et Gil-Pérez, 2012).

1.3.2 Distinguer l'enseignement et l'apprentissage

Alors que certains chercheurs utilisent le mot valise « enseignement-apprentissage », Astolfi et Chevallard distinguent les deux processus et repoussent l'idée d'une synchronisation temporelle entre eux. En effet, le verbe « apprendre » s'apparente aux verbes « entreprendre » ou « appréhender » (Aumont et Mesnier, 1992), et « désigne ce dont on doit s'emparer pour se l'approprier, pour l'appivoiser » (Astolfi, 2014, p. 57), alors que le verbe enseigner indique la création « des conditions matérielles, temporelles, cognitives, affectives, relationnelles, sociales pour permettre aux élèves d'apprendre » (Bru, 2001, p. 7). Selon Chevallard et Joshua (1991), l'enseignement et l'apprentissage ne se distinguent pas seulement par leur rapport à la durée mais aussi par le fait que le temps d'enseignement est consacré en grande partie à la préparation de la séance, alors que le temps d'apprentissage est caractérisé par des rétroactions continues de l'élève en situation.

Dans l'enseignement des sciences, l'écart entre le temps d'enseignement et le temps d'apprentissage est souvent mal perçu par les enseignants experts, qui ont du mal à transmettre un savoir qu'ils maîtrisent car ce qui leur semble évident est ignoré de l'élève (Vergnaud, 2011). Il arrive que les enseignants experts ne décodent plus l'erreur et l'assimilent à des problèmes d'ordre psychologique (manque de logique, manque d'analyse, faute de travail, faute de motivation...) (Astolfi, 2014 ; Giroux, 2014), alors qu'il faudrait plutôt s'appuyer sur les erreurs, et plus particulièrement les erreurs dues aux conceptions des élèves, pour créer des situations intelligibles favorisant la construction du savoir par l'élève (Astolfi, 2014; Baviskar, Hartle et Whitney, 2009). Cette amnésie de l'enseignant expert face à son propre parcours d'élève confirme ce que Bachelard (1938, p. 21) disait : « les professeurs de sciences, plus encore que les autres si c'est possible, ne comprennent pas qu'on ne comprenne pas ».

Un meilleur arrimage entre l'enseignement et l'apprentissage peut toutefois découler d'approches constructivistes modelées et développées dans le but de permettre des interactions avec l'environnement (Astolfi, 2014). L'application de telles approches est conditionnée par des facteurs personnels et professionnels relatifs à l'enseignant ainsi que par des facteurs curriculaires (Boilevin, 2013).

C'est dire que la personne et le parcours professionnel de l'enseignant sont au cœur de la réussite de la transposition du savoir en sciences. Cette transposition, centrée sur l'apprentissage, a tout avantage à tenir compte des conceptions des élèves dans le but de les faire évoluer.

1.3.3 Acquérir des connaissances et des savoirs en sciences

Le savoir savant, construit par la communauté scientifique, est inaccessible aux élèves. Il est révisé, remâché et organisé pour devenir apte à être enseigné (Brousseau, 2009). Ce parcours du savoir le long d'une chaîne de diffusion qui commence par une communauté scientifique, passe par des communautés institutionnelle, pédagogique et didactique et se termine dans la classe, est désigné par Chevallard « la transposition didactique ». Ce parcours fait subir de nombreuses manipulations au savoir parce que chaque communauté (scientifiques, concepteurs de programmes, auteurs de manuels, enseignants, etc.) l'envisage selon des angles et des registres différents et crée un objet d'enseignement fortement normé, « sans toujours

assumer la responsabilité épistémologique de cette puissance créatrice de normes » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 45).

Tardy (1994) fait l'inventaire des transformations que le savoir enseigné opère sur le savoir savant. Il distingue : la transposition terminologique banalisant le savoir, la dogmatisation dénuant le savoir de son sens, et les illustrations par des exemples ne tenant pas compte de l'épistémologie du savoir savant. Un processus de manipulation « épistémologique, sociologique et psychologique » (Tavignot, 1995, p. 31) fait s'éloigner le savoir enseigné du savoir savant ou des pratiques sociales de références. La transposition du concept de mole en est un bon exemple. La vulgarisation de ce concept, telle que préconisée par les nouveaux programmes, se caractérise par une confusion des définitions et un enseignement centré sur des algorithmes appliqués de façon automatique. L'aspect conceptuel et qualitatif du concept reste vague et mal illustré dans les exemples.

Comme moyens de remédiation, Karwera (2012) et Tavignot (1995) proposent de contrôler l'élaboration des programmes et des manuels, les méthodes d'enseignement en classe et le processus d'apprentissage des élèves, ce qui amène à soulever plusieurs défis de la transposition didactique : les facteurs influençant la sélection des savoirs par la noosphère (principalement les concepteurs de programme et les auteurs de matériel didactique), la cohérence de chaque concept dans les programmes, l'efficacité des manuels en tant qu'outil didactique, le rapport de l'enseignant au savoir, le rapport de l'enseignant au métier, la formation des enseignants, les conceptions alternatives des élèves et des enseignants....

De façon générale, l'enseignement des sciences s'effectue selon deux grandes approches : la transmission directe ou la construction par l'élève. Selon la première, l'élève doit s'approprier des savoirs enseignés et, selon la deuxième, l'enseignant doit proposer l'activité adéquate pour faire construire le savoir par l'élève (Potvin, 2011). Quelle que soit l'approche, le savoir que l'élève s'est approprié devient pour lui une connaissance. Ce n'est que lorsque cette connaissance devient utile en situation, autrement dit, lorsque l'élève est capable de l'investir dans une nouvelle situation, qu'elle retrouve certains des critères d'un savoir (Conne, 1992). Mais le processus d'apprentissage n'est pas linéaire et il est entravé par de nombreuses difficultés d'apprentissage d'ordre cognitif, disciplinaire et interdisciplinaire.

1.4 Les difficultés d'apprentissage en chimie

Les difficultés d'apprentissage, qui relèvent du rapport de l'élève au savoir, concernent les processus cognitifs déployés par l'élève lors de son apprentissage, les conceptions alternatives et les obstacles épistémologiques ainsi que le langage et l'abstraction du savoir en sciences.

1.4.1 Les conceptions et les obstacles

« Une conception est un système explicatif personnel et fonctionnel, qui n'est pas nécessairement exprimé au cours des activités scolaires » (Astolfi, et al., 2008, p. 147). L'élève n'arrive pas en classe la « tête vide ». Il dispose d'idées plus ou moins structurées, qu'il tente d'adapter à la situation, et ces idées constituent pour lui un système explicatif bien installé, qui joue le rôle de « “ filtres ” pour toute nouvelle information » (Giordan et Pellaud, 2004, p. 49). De même, ces conceptions sont, pour l'élève, satisfaisantes et fiables pour répondre rapidement à une question (Potvin, 2011). Donc, comme le dit Bachelard (1938, p. 16) : « Quand il se présente à la culture, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés. Accéder à la science, c'est spirituellement rajeunir, c'est accepter une mutation brusque qui doit contredire un passé ».

Les origines de ces conceptions sont diverses : le sens commun, les autorités (religion, philosophes, rois, etc.), les expériences personnelles, la déduction, l'induction et l'abduction (Thouin, 2014, 2015, 2017a). Malheureusement, les enseignants négligent les résultats des recherches en didactique au sujet de ces conceptions. Par exemple, les enseignants ne perçoivent pas la difficulté des élèves à appréhender la matière, au niveau sous-microscopique, car la matière est perçue comme continue par leurs sens (Potvin, 2011). Cette conception explique en partie pourquoi les élèves ont de la difficulté à comprendre le concept de mole, qui est incompatible avec cette conception de la matière. Bien comprises, les conceptions des élèves pourraient pourtant servir aux enseignants d'« adjuvants » (Thouin, 2017a) pour ajuster leurs stratégies d'enseignement et pour développer des pratiques plus efficaces (Giordan et Pellaud, 2004).

L'identification des conceptions des élèves au sujet d'un concept donné, ainsi que l'identification de l'origine de ces conceptions, pourrait pourtant s'avérer très utile pour

construire des séances d'enseignement. En effet, à la lumière de ces conceptions, les connaissances construites par les élèves pourraient parfois se révéler des obstacles qui entravent l'apprentissage de nouvelles notions.

Les conceptions relatives à différentes notions non reliées pourraient également émerger sous forme d'obstacles qui ont « un caractère plus général et plus transversal » (Astolfi et Peterfalvi, 1993, p. 106). En effet, dans certains cas, des obstacles épistémologiques généraux peuvent être à l'origine des conceptions relatives à certains concepts. Ainsi, les conceptions des élèves relatives au concept « le milieu » peuvent être dues à une association d'un obstacle lexical (distinguer milieu biologique et milieu géométrique), un obstacle tautologique (le milieu naturel de chaque animal), un obstacle anthropomorphique (chaque espèce puise sa nourriture de son milieu) et un obstacle holiste (considérer le milieu comme un tout) (Astolfi et Peterfalvi, 1993, p. 106).

Brousseau (2010) distingue les obstacles épistémologiques dont l'origine se situe dans l'histoire et dans la culture, des obstacles didactiques générés par l'enseignement, et des obstacles ontogénétiques dus au développement cognitif. Azcona, Furió-Mas et Guisasola (2002) notent que la connaissance de l'évolution socio-historique d'un concept améliore son enseignement et permet d'éviter que les obstacles épistémologiques de l'enseignant entraînent des obstacles didactiques chez les élèves.

Bouraoui et Chastrette (1999) se sont intéressés aux modes de raisonnements transdisciplinaires. Ils ont étudié les représentations des élèves tunisiens et français au sujet de la conduction dans les piles électrochimiques. Ils ont introduit le concept de « conceptions résultantes » (p. 51) qui proviennent de la fusion des représentations construites dans différentes disciplines. Ainsi, la conception « le courant est un déplacement d'électrons transportés par des ions » résulte d'une représentation construite en physique (le courant est un déplacement d'électrons) et d'une représentation provenant de la chimie (le courant est un déplacement d'ions en solutions). Par conséquent l'enseignement, et particulièrement en sciences, a intérêt à tenir compte des savoirs de diverses disciplines et à contrôler la construction des schèmes cognitifs pour éviter les conceptions résultantes dont le réseau formerait des obstacles didactiques, c'est-à-dire des obstacles causés par l'enseignement.

Mais les conceptions n'existent pas que chez les élèves ! Les enseignants n'ayant pas vécu un changement conceptuel durant leur parcours académique transposent parfois

implicitement des conceptions alternatives durant leur enseignement. Bêty (2009) a repéré des conceptions d'enseignants identiques à celles des élèves pour des concepts en électricité. Par exemple, penser que le courant diminue en parcourant un circuit, croire que la luminosité d'une ampoule dépend de sa proximité à la pile, confondre les branchements en série et en parallèle, confondre la tension et l'intensité. Cette même idée de conceptions identiques chez les enseignants et les élèves est mentionnée par Brousseau et Vásquez-Abad (2005) au sujet de divers concepts de chimie, comme ceux qui sont en lien avec le langage symbolique.

1.4.2 Le langage scientifique.

Il existe une étroite corrélation entre les lacunes dans la maîtrise du langage scientifique et le taux d'échec des élèves en sciences. Ce langage, « véhicule de la pensée et du raisonnement », est source de difficultés d'apprentissage (De Serres, Bélanger, Piché, Riopel, Staub et De Grandpré, 2003).

Le langage scientifique est constitué de trois langages distincts : 1) le langage naturel employé dans les énoncés, 2) le langage symbolique constitué par les symboles et les unités et 3) le langage graphique constitué par des éléments visuels (graphes, histogrammes, figures).

Le langage symbolique est reconnu pour son abstraction, mais le langage graphique est le plus abstrait car un seul outil de ce langage (comme un graphique) permet de synthétiser plusieurs données. De plus, les enseignants habitués à ce langage n'appréhendent pas et ne tiennent pas compte des difficultés des élèves à ce niveau (De Serres et al., 2003).

De nombreuses recherches en didactique traitent les difficultés langagières, dans un contexte disciplinaire ou interdisciplinaire. Elles mettent l'accent sur leur transformation en obstacles, dans la plupart des cas des obstacles didactiques qui inhibent le développement des compétences disciplinaires chez l'élève. Bélanger et De Serres (1998) ont repéré les difficultés langagières en mathématiques : reconnaître le sens de mots (exemple : les élèves traduisent l'expression « deux fois plus de garçons que de filles » par l'équation $2 \times G = F$) ; lire des graphes (exemple : confondre abscisse et ordonnée et ne plus reconnaître l'équation d'une droite en permutant x et y) ; comprendre un énoncé (exemple : distinguer les verbes d'action et saisir les attentes de l'enseignant) ; reconnaître des formes équivalentes. Ils confirment que l'élève

serait capable de surmonter plusieurs de ses problèmes d'apprentissage s'il arrivait à surmonter ses difficultés langagières.

Selon Dreyfus et Mazouz (1993), les difficultés des élèves de seconde à comprendre certains concepts de biologie découle souvent des problèmes qu'ils éprouvent à analyser un graphe, à traiter des rapports entre les variables représentées par des graphiques, à distinguer un graphe d'un tableau, ou à passer d'un mode à l'autre. Ces difficultés en mathématiques ont des répercussions négatives sur l'apprentissage de la biologie et peuvent générer des conceptions obstacles chez les élèves. Minier et Gauthier (2006) confirment les recherches menées par De Serres et Groleau (1997) qui constatent que les élèves écrivent des équations mathématiques erronées en raison de mauvaise compréhension des énoncés. Ils reprennent la conclusion de De Serres et al. (2003) selon laquelle les échecs en chimie et en physique au secondaire pourraient être en partie dus à des méconnaissances en français.

Barlet et Plouin (1994) montrent qu'en chimie, « le langage interagit fortement avec le concept [...]. Le langage chimique véhicule un “ déjà-là ” conceptuel très fort par où peuvent pénétrer des ambiguïtés et se renforcer les conceptions » (p. 51). Ils donnent des exemples de l'enseignement de l'équation chimique² modélisant une réaction et des obstacles qui peuvent en résulter : le corps pur composé est un simple mélange de corps purs simples ; la loi de la conservation implique qu'une même substance se trouve dans les réactifs et les produits et a changé de propriétés ; la conservation de la masse n'appartient pas au registre phénoménologique ni à celui d'un modèle ; le carbone se retrouve dans toute réaction chimique et particulièrement dans les réactions de combustion ; une symétrie visuelle et auditive doit se retrouver dans toutes les équations³ (Fillon, 1997). Un enseignement qui ne tient pas compte de ces conceptions alternatives crée des obstacles didactiques que Fillon (1997) classe en : obstacles liés à la perception, obstacles liés à l'absence, obstacles liés au manque de maîtrise de certains concepts et obstacles liés à des modes de raisonnement transdisciplinaires.

Les langages symbolique et graphique en chimie gardent un degré d'abstraction élevé puisque, dans cette discipline, l'élève doit appréhender des ordres de grandeur différents de son environnement. Dans ce qui suit les difficultés propre au domaine de la chimie sont présentées.

² Barlet et Plouin (1994) considèrent le concept de l'équation bilan comme un « concept intégrateur » car il intègre des notions qualitatives et quantitatives intégrant le symbolique, le macroscopique et le sous-microscopique. De même que ce concept exige une appropriation de concepts fondamentaux comme atome, molécule, ...

³ Exemple : monoxyde de cuivre + carbone \rightarrow monoxyde de carbone + cuivre

1.4.3 Les domaines du savoir en chimie.

Johnstone (1993) a proposé le triangle des savoirs en chimie dont les sommets sont le macroscopique, le sous-microscopique et le symbolique. La création des liens entre les trois sommets, ou « la relation du triplet », est importante dans l'enseignement de la chimie (Gilbert et Treagust, 2009). Toutefois, cette relation est problématique car les enseignants expliquent à l'échelle macroscopique et créent des liens avec le symbolique mais passent directement à l'échelle sous-microscopique sans tisser des liens entre ce domaine et les autres (Levy, Hofstein, Mamlok-Naaman et Bar-dov, 2004). L'antagonisme microscopique-macroscopique est alors un obstacle caractéristique de la chimie (Barlet et Plouin, 1997).

Cormier (2014) confirme que les élèves ne comprennent pas les représentations symboliques des molécules et des composés ioniques, qui relèvent du domaine sous-microscopique. L'acquisition de ce symbolisme, selon la chercheuse, a des effets positifs sur l'appréhension de la définition de la molécule. De même, les élèves manipulent le calcul de proportionnalité en considérant une équation (domaine du symbolique) mais ils ont de la difficulté à manipuler des représentations schématiques d'une réaction. Ils n'arrivent pas à créer des liens entre ce domaine sous-microscopique et le domaine symbolique de l'équation. Un enseignement basé sur de tels exercices fait évoluer l'apprentissage des élèves (Cormier, 2014). Aussi, les élèves transposent les propriétés de la matière (échelle macroscopique) aux atomes (échelle sous-microscopique), ce que Cormier (2014) explique par un obstacle épistémologique. En effet, étant donné que le domaine sous-microscopique n'est pas perceptible à l'œil nu, les élèves décrivent la matière de façon continue, telle qu'ils la voient.

Viser, dans son enseignement, un apprentissage efficace de la chimie consiste à considérer les conceptions alternatives des élèves, les difficultés langagières et les trois domaines du savoir que sont le macroscopique, le sous-microscopique et le symbolique. Répertorier et surmonter ces difficultés facilite notamment l'enseignement du concept de mole.

1.5 Les difficultés d'apprentissage du concept de mole et de l'unité du SI qui lui sont associées

Ce n'est qu'en 1971 que la 14^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) adopta la mole (quantité de matière) comme septième unité du Système International (SI). L'adoption de cette unité faisait suite à celles du kilogramme (masse), de la seconde (temps), du mètre (longueur), du kelvin (température), de l'ampère (intensité électrique) et du candéla (intensité électrique). La mole passait ainsi, avec beaucoup de retard, du statut de concept au statut d'unité.

Au moment de son adoption, la mole fut définie de la façon suivante :

« La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12, les atomes de carbone 12 étant au repos et dans leur état fondamental. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être précisées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules. »

On voit donc que la complexité de cette définition est beaucoup plus grande que celle d'unités telle que la masse, la longueur ou la température ce, qui d'entrée de jeu, serait déjà suffisant pour expliquer un grand nombre des difficultés d'apprentissage des élèves. On constate également une grande parenté entre la masse et la mole, qui sont deux unités du SI relatives à une quantité de matière, ce qui ne contribue évidemment en rien à la compréhension de ce qu'est une mole.

1.5.1 Les obstacles épistémologiques relatifs au concept de mole

Comme le cadre théorique le montrera de façon plus exhaustive, l'histoire du concept de mole et de l'unité qui lui correspond est elle-même assez complexe et chacune des étapes de son évolution a laissé des traces, à la fois dans la communauté scientifique des chimistes, dans l'enseignement de la chimie, dans les manuels scolaires ainsi que dans les conceptions fréquemment rencontrées chez les enseignants et les élèves.

Par exemple, à l'époque (vers 1811) où Avogadro émet l'hypothèse à la base du concept de mole (hypothèse selon laquelle il y a le même nombre de molécules dans des volumes égaux de gaz différents à la même température et à la même pression), la théorie atomique était loin d'être adoptée par la majorité des physiciens et des chimistes (Padilla et Furió-Mas, 2008). En fait, il fallut attendre près d'un siècle pour que la théorie atomique puisse être considérée comme le paradigme « normal » dans ces disciplines (Padilla et Furió-Mas, 2008).

Par conséquent, pendant de nombreuses décennies, le concept de mole fut utilisé par des scientifiques qui l'interprétaient de façons très diverses. Certains y voyaient surtout un nombre, d'autres une masse, d'autres une technique de calcul, et d'autres encore une quantité de matière. L'acceptation de la mole en tant qu'unité de la quantité de matière eut lieu après plus d'un demi-siècle de conflit entre le paradigme d'équivalence en masse, qui ne reconnaissait que l'échelle macroscopique, et le paradigme de la théorie atomique, qui distinguait un domaine sous-microscopique d'un domaine macroscopique. De nombreux chercheurs, comme De Bièvre (2014) ou Furió-Mas, Azcona et Guisasola (2002) ont d'ailleurs fait remarquer la multitude des définitions du terme mole, depuis le XIX^e siècle, qui découlent entre autres des divers paradigmes dans lesquels le concept a été situé.

À la lumière de cette évolution socio-historique, il n'est donc pas tellement étonnant de retrouver, dans les manuels scolaires comme chez les enseignants et les élèves, une grande variété de conceptions au sujet de la mole. Par exemple, comme l'ont montré Bélanger et Verreault (2008), plusieurs élèves qui suivent le cours de chimie de la 5^e année du secondaire croient que la mole ne sert qu'à simplifier les calculs, que la mole n'est que le nombre d'Avogadro, ou encore que la masse molaire s'exprime en unités de masse atomique.

1.5.2 Les obstacles didactiques relatifs au concept de mole

Dans le cas de la mole, les difficultés des élèves, qui n'ont pas de représentations de ce concept, ne sont pas dues à des conceptions initiales, mais à des stratégies d'enseignement inappropriées (Furió-Mas, Azcona et Guisasola, 2002). Durant son enseignement, le concept de mole est déproblématisé et décontextualisé. Une première hypothèse serait que les enseignants eux-mêmes ont des difficultés avec ce concept (Furió, Azcona, Guisasola, et Ratcliffe, 2000), par exemple parce que la quantité de matière dont l'unité est la mole se

distingue de la quantité de matière que définit la masse. Une deuxième hypothèse serait que les enseignants possèdent la conception que la mole est associée à l'unité d'une masse qui sert à compter des entités (atomes, ions, molécules) en chimie (Furió et al., 2000).

Certains chercheurs remettent en question la formation initiale des enseignants parce qu'elle accorde souvent peu d'importance au concept de mole et signalent que les enseignants ne reçoivent pas de formation sur son épistémologie et son évolution socio-historique. La mole est surtout abordée selon une approche opératoire (Furió et al., 2000). A l'université, les professeurs considèrent le concept comme acquis et proposent des applications dans lesquelles le concept de mole est utilisé. Strömdahl, Tulberg et Lybeck (1994) montrent que seulement 11% des enseignants reconnaissent que la mole est l'unité de la quantité de matière dans le SI, que 25% confondent la mole et la masse, et que 61% font correspondre la mole à toute quantité équivalente au nombre d'Avogadro. Les chercheurs expliquent que les enseignants transposent ce concept selon des représentations construites durant leur parcours scolaire et qu'ils sont aux prises avec de nombreuses confusions épistémologiques au sujet de ce concept. D'après Furió, Azcona, Guisasola, et Ratcliffe (2000), 45% des enseignants confondent la quantité de matière et le nombre d'atomes et que 39% la confondent avec la masse. Peu d'enseignants considèrent qu'il est essentiel d'établir les relations entre les différentes variables (quantité de matière, masse et nombre d'atomes). Toutes ces confusions pourraient être transmises aux élèves durant un enseignement mal planifié (Fang, Hart et Clarke, 2016; Furió et al., 2000 ; Strömdahl, Tulberg et Lybeck, 1994).

Selon Fang, Hart et Clarke (2016), l'évolution socio-historique atypique du concept de mole et sa complexité pourraient être à l'origine des difficultés d'enseignement et même des tentatives d'évitement des enseignants en lien avec ce concept. Leur recherche, menée dans deux pays auprès d'enseignants ayant au moins cinq années d'expérience, montre que les enseignants peuvent avoir deux types d'idées sur la façon de l'expliquer : 1) utiliser des échelles empiriques (masses et volumes) pour expliquer les concepts ; 2) adopter et accepter le modèle scientifique à l'échelle macroscopique pour mesurer des masses, des volumes et le nombre d'entités élémentaires.

Le concept de « nombre d'Avogadro », essentiel dans le concept de mole, est d'ailleurs lui aussi assez problématique. D'une part, le nombre d'Avogadro définit à la fois la quantité de matière contenue dans une mole et l'unité de la masse atomique par rapport au système

international, ce qui n'est pas évident. D'autre part, au laboratoire, les manipulations qui permettent de déterminer le nombre d'Avogadro sont relativement complexes et difficiles à répéter (Moss et Pabari, 2010). À noter que ce nombre fut déterminé par le physicien français Jean Perrin, en 1908, et non par Avogadro qui n'en avait qu'une assez vague idée. Avogadro était mort quand ce nombre fut adopté par la communauté scientifique en 1960. Perrin réussit à déterminer ce nombre là où bien d'autres chercheurs avaient échoué, en étudiant le mouvement brownien des gaz (Levy, 2015). Toutefois, des corrections ont été apportées à ce nombre plusieurs fois. La plus récente date de novembre 2018 (CGPM, 2018). Sans oublier que la controverse entre considérer le nombre d'Avogadro comme un simple nombre ou comme une constante dont l'unité est mol⁻¹ existe depuis longtemps (CGPM, 2018). Réussir à définir clairement ce nombre est donc une contrainte importante dans un enseignement efficace de ce concept.

Les chercheurs, comme Fang et al. (2016), Furió et al. (2000), montrent qu'il est essentiel que les enseignants aient une perception épistémologique et historique du concept de mole, à la fois pour corriger leurs propres conceptions et pour éviter de créer des obstacles d'apprentissage chez les élèves.

1.5.3 Les obstacles d'apprentissage dus au concept de mole

Les obstacles épistémologiques et didactiques se déclinent en obstacle d'apprentissage chez l'élève. Meyer et Land (2006) reprennent de Perkins les caractéristiques d'un obstacle d'apprentissage : 1) l'élève est capable d'accomplir des tâches superficielles en lien avec un concept, mais sans en comprendre le sens intrinsèque ; 2) le concept n'est pas utilisé par l'élève dans des situations autres que scolaires ; 3) le concept est difficile à s'approprier car il est contre-intuitif ou compliqué ; 4) le langage associé au concept est complexe. Plusieurs recherches (Furió-Mas et al., 2002 ; Moss et Pabari, 2010) montrent que les élèves appliquent des algorithmes d'une façon très passive. Par exemple, les relations impliquées dans des calculs impliquant la mole sont enseignées sous forme d'un triangle facilitant à l'élève le choix de l'opération de multiplication ou de division. Comme explicité ci-dessus, le concept de mole, en raison des liens qu'il exige entre deux domaines contre-intuitifs serait compliqué et lui-même contre-intuitif. Quant au langage, il pose des problèmes terminologiques dus au grand nombre

de définitions de la mole (Furió-Mas et al., 2002), ainsi que des confusions phonétiques ou graphiques avec le mot molécule, avec l'expression masse molaire ou avec le symbole du sodium. Selon Gabel, Sherwood et Enochs (1984), le mot mole serait problématique parce qu'il n'est pas familier. Le remplacement de ce mot par des mots familiers arbitraires (sucre ou orange) aurait atténué les difficultés d'apprentissage des élèves.

Des difficultés en mathématiques peuvent également se décliner en obstacles d'apprentissage du concept de mole. Tout d'abord, l'aspect quantitatif de la mole est une application de la proportionnalité en mathématique. Toutefois, si l'élève reconnaît verbalement la relation de proportionnalité (exemple : quand la masse de l'échantillon augmente, la quantité de matière des entités chimiques augmente), il est souvent incapable de décrire le modèle théorique associé à cette proportion (Gauthier, 1998). Ensuite, la valeur du nombre d'Avogadro est problématique puisque l'élève doit appréhender un nombre immense d'entités dans une quantité de matière relativement petite à l'échelle macroscopique. Par exemple, une craie de 50 g est formée de $3,01 \times 10^{23}$ entités de CaCO_3 c'est-à-dire de $3,01 \times 10^{23}$ ions calcium et de $3,01 \times 10^{23}$ ions carbonate (eux-mêmes formés de $3,01 \times 10^{23}$ atomes de carbone et de $9,03 \times 10^{23}$ atomes d'oxygène). Pour aider les élèves à mieux saisir l'idée de ce nombre, on utilise des analogies telles que 1 mol de sable couvre la Californie, ou 1 mol de guimauves couvre la totalité des USA avec une profondeur de 600 miles (Kolb, 1981), ou l'océan Pacifique contient 7×10^{23} mL d'eau, ce qui est équivalent à un nombre d'Avogadro de millilitres (Alexander, Ewing et Abbott, 1984). À noter cependant que si le domaine de référence et le domaine cible de ces analogies comportent des similitudes, les limites des analogies sont à préciser, d'autant plus que le transfert du domaine de référence au domaine cible exige de l'élève qu'il soit capable de réduire l'échelle (Sarantopoulos et Tsaparlis, 2004), ce qui est loin d'être toujours le cas.

Le concept de mole possède deux aspects problématiques. D'une part, l'aspect qualitatif du concept, décrit ci-dessus, est abstrait et exige un développement cognitif de l'élève qui se situe au stade des opérations formelles (Herron, 1975). D'autre part, l'aspect quantitatif exige de l'élève qu'il soit très à l'aise avec les grands nombres, la notation scientifique, et les opérations sur ces nombres (Bou Jaoudé et Barakat, 2003). De plus l'utilisation d'algorithmes mathématiques risque d'obscurcir le contenu proprement chimique du concept (Moss et Pabari, 2010). D'ailleurs, Fang et al. (2016) confirment que les élèves qui réussissent des exercices

portant sur l'aspect quantitatif de la mole ont peut-être développé des habiletés mathématiques, mais n'ont pas nécessairement compris le concept.

La formation des enseignants ne les aide pas toujours autant qu'il serait souhaitable à maîtriser l'enseignement de ce concept où convergent des difficultés épistémologiques, des difficultés dues aux domaines du savoir en chimie, des difficultés langagières et des difficultés liées à des compétences en mathématiques. De plus, la prochaine section montre qu'on ne peut malheureusement pas faire entièrement confiance aux manuels scolaires lorsqu'on enseigne le concept de mole.

1.6 Les manuels scolaires de chimie

À la première étape de la transposition didactique, la noosphère (concepteurs de programmes) négocie les tensions entre la société et l'école pour déterminer les contenus d'apprentissage (Tavignot, 1995). Le programme se concrétise ensuite dans des manuels scolaires qui sont « une réponse à un appel d'offres ou à un cahier de charges édicté par les pouvoirs publics » (Gérard, 2010, p. 16).

1.6.1 Les programmes de sciences et de technologie

Depuis 1990, dans plusieurs pays du monde, les programmes d'études ont été réformés selon une approche qui vise le développement de compétences.

En France (pays dont s'inspire beaucoup le Liban), malgré les différentes réformes des curriculums et bien qu'en théorie les nouveaux programmes de sciences visent le développement de compétences portant sur la résolution de problèmes et le travail de laboratoire, dans les faits, les programmes de sciences de la Terre et de chimie sont restés « trop “ théoriques ” et pas assez “ expérimentaux ” » (Boilevin, 2013, p. 58). Boilevin (2013) confirme ce que Joshua et Dupin (1993) ont montré : l'enseignement des sciences reste imprégné par le positivisme et garde son héritage des méthodes inductivistes. De plus, dans le programme de chimie, le concept de mole ne correspond plus à une section distincte, mais se

retrouve dans un chapitre portant sur la compréhension et les applications quantitatives d'une équation chimique.

Au Liban, les programmes sont encore conçus selon une pédagogie par objectif. Le concept de mole se retrouve dans une section distincte qui comporte des notions théoriques et des applications, mais il ne bénéficie pas d'un enseignement bien planifié car il se retrouve rarement dans les examens officiels. Ce manque de planification risque donc d'entraîner des difficultés supplémentaires, pour les élèves, dans l'apprentissage d'un concept qui se bute déjà à de nombreux obstacles épistémologiques et didactiques.

1.6.2 Les savoirs dans les manuels scolaires

Le manuel scolaire constitue le matériel didactique préféré des enseignants. Ils s'y réfèrent pour retrouver le savoir à enseigner ainsi que les stratégies de travail (lectures, exercices, travaux pratiques, etc.) qu'ils peuvent proposer aux élèves (Riquois, 2010). Le manuel joue alors le rôle d'« un adjuvant afin d'unifier les pratiques de classe et les injonctions officielles » (Braun, 2010, p. 9) et son usage détermine la méthode d'enseignement (Mingat et Suchaut, 2000). C'est pourquoi l'analyse pédagogique et didactique des manuels scolaires est devenue un volet important des recherches en sciences de l'éducation.

Des recherches montrent toutefois que les manuels scolaires risquent, d'une part, de « brimer la créativité des enseignants » (Gérard, 2010, p. 14) et de bloquer leur parcours de professionnalisation, et d'autre part, d'être parfois incompatibles avec les programmes d'études. De plus, les enseignants choisissent parfois les manuels en fonction de l'utilité des textes et des exercices qu'ils comportent, sans accorder suffisamment d'importance à la structuration des connaissances ou à une évaluation véritablement formatrice des apprentissages (Gérard, 2010).

D'autres recherches confirment l'influence des besoins socioéconomiques sur l'évolution des manuels scolaires. Ainsi, en français langue étrangère, Riquois (2010) note une évolution qui va d'une perspective « communicative » à une perspective « actionnelle » qui favorise aussi l'utilisation des nouvelles technologies. Bernard, Carvalho et Clément (2007) signalent que l'évolution des manuels scolaires de biologie, en France, témoigne d'une importance croissante accordée à l'égalité entre l'homme et la femme, qui est maintenant reconnue comme une valeur sociale importante. Par ailleurs, l'analyse des schémas représentant

l'évolution humaine dans les manuels scolaires montre une modification graduelle du langage, des médiations et de l'actualisation du savoir qui confirment la volonté de la noosphère de transgresser le registre religieux en éliminant le finalisme et l'anthropocentrisme (Quessada et Clément, 2013).

De tels exemples font ressortir le fait que le savoir scientifique enseigné dépend en partie des valeurs de la société et de la place accordée à certains thèmes. Qu'en est-il dans le cas d'un concept abstrait, comme la mole, qui est important à l'échelle industrielle mais absent dans la vie de tous les jours ?

1.6.3 Le concept de mole dans les manuels scolaires

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la transposition didactique du concept de mole dans les manuels scolaires.

Padilla et Furió-Mas (2008) ont analysé 30 manuels scolaires de chimie générale adoptés au collège. Les manuels choisis étaient de réputation internationale et ont été adoptés pour certains cours universitaires. Selon les chercheurs, dans 90% des manuels, le concept est déproblématisé et aucune notion d'histoire du concept n'est présentée. Les chercheurs notent aussi des confusions dans les définitions ou même une absence de définitions ; 7% seulement présentent des définitions conformes à celle de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) ; 33% confondent la mole et la masse molaire ; 93% présentent la mole comme étant le nombre d'Avogadro et 27% la présentent comme un volume. Dans ces manuels, l'évolution du concept est présentée de façon très linéaire et on affirme que c'est Avogadro, et non Ostwald (qui est le premier scientifique à avoir défini la mole), qui a défini le concept.

L'analyse de 174 manuels scolaires édités entre 1976 et 1996 montre que le concept de mole est présenté d'une façon déproblématisée et ahistorique (Furió et al., 2000) ; les questions et les exercices portant explicitement sur le concept de mole sont absents et le terme « quantité de matière » n'est pas explicité ; la plupart de ces manuels n'adoptent pas les définitions du Système international d'unités (SI) et confondent la quantité de matière avec la masse ou le volume ; le concept de mole est presque toujours intégré dans des résolutions de questions relatives à d'autres concepts (Furió et al., 2000). Les résultats d'une analyse plus récente de

manuels scolaires mexicains corroborent les résultats présentés ci-dessus (Fang et al., 2016). Ces chercheurs remettent même en question la validité scientifique du contenu de ces manuels.

Pekdag et Azizoglu (2013) ont analysé 15 manuels scolaires de chimie adoptés aux États-Unis, en France et en Turquie, dont 5 sont des manuels pour le secondaire et 10 sont des manuels universitaires. Le but de leur analyse était de répertorier les erreurs sémantiques dans les manuels. Ils distinguent : 1) des erreurs de concepts manquants (exemple : au lieu de : « Combien de moles y a-t-il dans 45,6 g de NH_3 ? » il serait préférable de dire « Quelle est la quantité de matière dans 45,6 g du gaz NH_3 ? », puisque la précision de l'état physique est un indicateur de l'échelle macroscopique). 2) des incohérences (exemple : l'expression « la masse, m , correspond à n mol » risque d'être reformulée par l'élève sous forme de l'égalité « $m = n$ » ; il serait donc préférable de dire, « la masse, m , est reliée à la quantité de matière par la relation $m = n \times M_{\text{molaire}}$ »). 3) des expressions inappropriées (exemple : « la masse molaire d'un composé est la somme des masses molaires des atomes le constituant »), qui témoignent d'une confusion entre l'échelle sous-microscopique et l'échelle macroscopique, devraient être remplacées par des expressions telles que « la masse molaire d'un composé est la somme des masses molaires des éléments le constituant ».

Giunta (2015) a comparé les définitions qu'on trouve dans les manuels américains les plus utilisés avec celles du SI et souligne les exemples suivants : Gilbert et al. (2015) définissent la mole comme étant « la quantité de matière (atomes, ions ou molécules) que contient le nombre d'Avogadro ($N_A = 6,022\ 141\ 29 \times 10^{23}$) d'entités » ; Tro (2011) dit que la mole est « l'unité définie pour une quantité de matière comportant $6,022\ 141\ 29 \times 10^{23}$ (nombre d'Avogadro) entités » et ce même auteur intitule son chapitre « The Mole : A Chemist's Dozen » (La mole : la douzaine de la chimie) ; dans son livre « La chimie en 100 nombres » Levy (2015) définit la mole comme étant la quantité de matière qui contient un nombre d'Avogadro d'entités élémentaires, quelles qu'elles soient : photons, électrons, ions, atomes, molécules... » (p. 168) ; Giunta retient aussi la définition de Silberberg (2013) qui se conforme à la définition formelle. Giunta (2015) conclut sur deux aspects : 1) les définitions proposées ne sont pas exactement celles du SI ; 2) les auteurs évitent l'expression « quantité de matière », probablement parce qu'ils estiment qu'elle pourrait provoquer des obstacles à l'apprentissage, ce qui rend la définition de mole moins précise.

Dans la présente recherche, les enseignants se sont servis des manuels libanais (le manuel officiel du Ministère, les manuels édités par *School Press* et Habib) et disposaient aussi, comme ressources complémentaires, des manuels français. L'analyse de ces manuels (voir Annexe 3) corrobore les résultats de recherche présentés précédemment. Le concept de mole est abordé d'une façon superficielle, déproblématisée et ahistorique. Dans les manuels libanais, le concept est présenté d'une façon encyclopédique en lui associant des exercices ou des problèmes de savoir-reproduire. Dans les manuels français, le concept de mole est plutôt intégré à la stœchiométrie. Les activités proposées dans les livres français s'appuient sur des algorithmes mathématiques plutôt que sur des démarches de résolution de problèmes scientifiques et technologiques. Les définitions proposées sont conformes à celles du SI mais les modèles relationnels y sont transmis d'une façon dogmatique et non établies. Des erreurs sémantiques se sont glissées dans plusieurs manuels libanais et français. Par exemple, l'élève doit considérer le nombre de masse A comme étant la masse molaire. Dans les exercices proposés, les questions sont formulées en utilisant les expressions « Combien de moles ... » « Calculer le nombre de moles » « calculer la quantité en mole » ; l'expression « quantité de matière » est évitée dans les consignes. Dans les manuels français, les applications concernent un calcul de quantité de matière formée de molécules, ce qui restreint le concept aux molécules et non à toutes les entités chimiques. Dans l'un des manuels français, on donne un lien vers une animation qui consiste surtout à énumérer, dans une chanson, les unités et les sous unités de la mole. L'erreur la plus grave est qu'à la fin de cette animation, le symbole du nombre d'Avogadro (N_A) est confondu avec le symbole de l'élément sodium (Na) !

D'après Brousseau et Vasquez-Abad (2005), dans les manuels québécois, le concept de mole n'a pas le mérite d'être abordé seul et est associé à des notions et à des concepts comme la concentration, les ions, le changement d'unité de gramme en mol. Pourtant, l'appropriation du concept de mole est essentielle à l'apprentissage d'autres concepts et de notions ultérieures comme : pH-métrie, stœchiométrie, dosage volumétrique, équilibre chimique ...

Si l'on tient compte du fait que le manuel scolaire est son matériel didactique principal, l'enseignant se retrouve devant des impasses. D'une part, la simplification adoptée lors de la transposition didactique du concept de mole éloigne le savoir à enseigner du savoir savant : le domaine sous-microscopique est mal distingué du domaine macroscopique, le langage scientifique utilisé comporte des erreurs et la modélisation de ce concept n'est pas enseignée.

D'autre part, l'enseignant est incapable de critiquer le contenu de ces manuels car, durant sa formation universitaire, ce concept a surtout été abordé d'une façon opératoire (Furió et al., 2000). La présentation du concept de mole dans les manuels universitaires n'est d'ailleurs pas tellement meilleure que dans manuels des ordres d'enseignement inférieurs. Bièvre (2014) cite les résultats d'une recherche menée par Hibbert, portant sur l'analyse de 18 manuels universitaires de chimie générale utilisés en 1^{ère} année universitaire et publiés entre 1989 et 2014, en Europe et aux Etats-Unis, qui permet de constater que la définition du concept ne respecte celle du SI que dans quatre manuels (Ces résultats ont été divulgués au cours de la 20^e rencontre du CCQM en avril 2014).

En conclusion, les manuels constituent des outils didactiques importants qui témoignent d'une interaction entre les savoirs et les valeurs de la noosphère. Dans certains cas, leur usage peut entraîner des obstacles didactiques puisqu'ils risquent, faute d'une médiation et d'une transposition correctes des savoirs savants, d'accroître les difficultés de l'enseignement.

1.7 Les difficultés de l'enseignement des sciences

En didactique, l'enseignement peut être défini comme étant « l'ensemble des activités déployées par les enseignants, directement ou indirectement, afin qu'au travers de situations formelles (dédiées à l'apprentissage, mises en place explicitement à cette fin), des élèves effectuent des tâches qui leur permettent de s'emparer de contenus spécifiques (prescrits par l'institution, organisés dans une discipline...) » (Reuter, Cohen-Azria, Daunay, Delcambre et Lahanier-Reuter, 2013, p. 91). Une définition qui témoigne du passage de programmes centrés sur l'enseignement à des programmes centrés sur l'apprentissage, ce qui rend la transposition didactique interne moins évidente (Granger, 2014).

En pratique, l'enseignant risque d'adopter deux positions vis-à-vis certains savoirs relativement complexes : soit il renonce à en expliquer les détails et se limite au strict nécessaire, comme c'est souvent le cas dans l'enseignement du concept de mole, soit il approfondit les notions dont l'appréhension dépasse le niveau de maturité cognitive de l'élève et espère qu'elles seront comprises plus tard au cours du parcours scolaire (Astolfi et al., 2008).

1.7.1 Les représentations des enseignants et les approches constructivistes

Minier et Gauthier (2006) ont mené leur recherche auprès de six enseignants volontaires du primaire pour repérer leurs représentations de la transposition didactique, identifier leur modèle pédagogique et préciser le lien entre leurs représentations et leur pratique. Les chercheurs ont montré que cinq des six enseignants soutiennent, dans leur discours, l'efficacité des perspectives constructivistes mais appliquent, dans leur pratique, des méthodes transmissives. Ces enseignants apprécient la facilité des méthodes transmissives qui n'exigent ni la conceptualisation, ni la création de liens entre l'expérimentation et la théorie. Mais enseigner un concept ne consiste pas uniquement à le définir mais à établir des liens avec d'autres concepts et à présenter son évolution socio-historique (Azcona, et al., 2002 ; Furio et al., 2000 ; Padilla et Furio-Mas, 2008). Par conséquent, les pratiques traditionnelles risquent de réduire le savoir enseigné à un texte dénudé des dimensions importantes du savoir savant et de le « dramatiser » sous forme d'exposés, au risque de parfois ajouter au savoir savant « des éléments qui n'y sont pas contenus » (Philippe, 2010, p. 94). Ces pratiques expliquent en partie les difficultés d'apprentissage de la mole présentées ci-dessus (section 1.5).

« Apprendre les sciences est quelque chose que les élèves font, pas quelque chose qui leur est fait » (*National Research Council, [NRC], 1996, p. 20*). Selon cette approche, l'enseignant planifie une situation d'apprentissage au cours de laquelle l'élève peut questionner la nature et chercher des réponses en manipulant et en expérimentant avec du matériel qui lui est familier. Cette approche favorise le développement d'attitudes et d'habiletés scientifiques ainsi que des ruptures épistémologiques et des changements conceptuels chez l'élève et présente le potentiel de rendre le rapport de l'élève aux sciences positif (Thouin, 2017a). Gill-Pérès (1993) et Hofstein, Maoz et Rishpon (1990) relèvent l'efficacité de l'enseignement à l'aide d'activités ancrées dans des pratiques quotidiennes et enrichies par des démarches expérimentales. Cette approche est plus efficace que la simple vérification de lois scientifiques puisqu'elle mobilise des compétences de haut niveau, alors que la vérification se limite habituellement à une exécution de tâches qui vise surtout le développement de techniques de manipulations (Hattie, 2009). Philippe (2010) confirme que ce processus d'enseignement, selon la stratégie de Decroly, où l'élève confronte des situations réelles globales, favorise une appropriation de savoirs théoriques, abstraits et formels. Allier ces activités constructivistes avec

le contenu des programmes de formation donne plus d'authenticité au savoir enseigné (Hofstein, Maoz et Rishpon, 1990) mais rend la planification de l'enseignement plus exigeante (Granger, 2014).

Toutefois, plusieurs enseignants fuient les exigences des approches constructivistes et ne déploient pas suffisamment d'effort pour acquérir les notions disciplinaires correctes ou enrichir leur culture scientifique et technologique (Thouin, 2017a). De plus, bien que leur formation initiale permette aux enseignants de se familiariser avec ces approches, elle contribue parfois très peu à leur pratique effective qui n'est souvent pas exigée lors des stages dans le milieu scolaire. Par conséquent, plusieurs enseignants évitent de les appliquer, de peur de se sentir démunis face aux questions posées par leurs élèves qui tentent de résoudre des problèmes scientifiques et technologiques (Bachtold, 2012 ; Boilevin, 2013 ; Gill-Pérez, 1993 ; Hattie, 2009 ; Philippe, 2010).

1.7.2 Les pratiques d'enseignement

Il semble que les décideurs institutionnels et politiques ignorent encore souvent les résultats des recherches en didactique des sciences (Weil-Barais et Golfard, 2005). L'idée qu'il suffit de bien maîtriser la matière (Weil-Barais et Golfard, 2005) ou de s'y intéresser véritablement (Philippe, 2010) pour bien l'enseigner est toujours assez répandue dans le milieu scolaire. Dans leurs pratiques, les enseignants se heurtent à des obstacles « où se mêlent le sociétal, l'institutionnel et le personnel » (Cifali, 1996, p. 120). Seuls les enseignants réflexifs arrivent à surmonter ces obstacles au fil de l'évolution de leur identité professionnelle (Pérez-Roux, 2010).

Potvin (2011) propose différentes situations d'apprentissage ouvertes (SAO), chacune étant un problème comportant plusieurs contraintes que l'élève doit surmonter en vivant un conflit cognitif intra-personnel et interpersonnel (dans le groupe). Dans chacune de ces situations, l'élève doit rechercher, sélectionner, justifier et exécuter des choix de solutions. Au cours de l'apprentissage, l'enseignant, concepteur de la situation, vérifie, guide, oriente et argumente pour garantir l'authenticité du savoir enseigné en regard du savoir savant. L'acquisition, par l'enseignant, d'un savoir disciplinaire pertinent, d'un esprit critique et d'une aptitude à travailler en équipe, est nécessaire pour la réussite de ce type de méthodes

d'enseignement. Néanmoins, le développement de telles pratiques enseignantes dépend des formations initiales, des conditions institutionnelles et personnelles ainsi que des formations continues.

Toujours dans cette perspective constructiviste, Brousseau, Brousseau et Warfield (2001) proposent une démarche didactique d'introduction à la probabilité et aux statistiques destinée à des élèves du primaire. Les élèves s'engagent dès la première séance dans la construction de diverses notions. L'enseignante qui participe à la recherche possède les connaissances et les compétences lui permettant de concevoir un environnement propice à la construction du savoir par les élèves et d'éviter la rupture du contrat didactique. Toutefois, la démarche décrite comportait 27 situations didactiques d'une durée de 15 à 30 minutes, ce qui pouvait être considérée comme peu réaliste par la majorité des enseignants et risquait de diminuer grandement leur intérêt pour une telle démarche.

Toutes les recherches de ce genre montrent que pour être en mesure d'appliquer des approches constructivistes, l'enseignant doit bénéficier de conditions favorables sur le plan 1) institutionnel et organisationnel (exemples : ressources humaines, matériel, temps) ; 2) pédagogique (gestion de la classe) et 3) didactique (exemples : gestion du contenu, méthodes d'enseignement). Tenir compte des résultats de ce genre de recherches permet à la noosphère de concevoir des programmes de formation compatibles avec les méthodes d'enseignement qui ont montré le plus d'efficacité pour que l'élève puisse construire le « savoir enseigné » (Duit, 2007, p. 9-10).

Les difficultés d'enseignement décrites ci-dessus, qui sont dues en bonne partie à une certaine méfiance des enseignants à l'égard de la mise en pratique des approches constructivistes, se répercutent dans l'enseignement du concept de mole.

1.7.3 L'enseignement du concept de mole

« La mole permet de “ compter en pesant ” » (Levy, 2015, p. 168). Mais c'est un concept qui a souvent été mal compris des enseignants eux-mêmes, durant leur parcours scolaire, et qui est négligé dans les formations universitaires.

Pour mieux comprendre l'importance d'enseigner le concept de mole en chimie, un aperçu historique sur l'introduction de ce concept, dans les savoirs savants en chimie, peut être

utile. Rappelons tout d'abord, que la chimie est née quand certains alchimistes commencèrent à faire des études quantitatives (Levy, 2015). L'essor de la chimie, nouvelle science, a commencé vers la fin du XVIIIe s. quand Richter, mathématicien a introduit la stœchiométrie en utilisant des rapport de masses (Padilla et Furió-Mas, 2008). Toutefois, cette approche, qui définissait le paradigme d'équivalence en masse, ne pouvait pas expliquer les différentes combinaisons entre deux éléments (comme les différentes formules d'oxydes d'un même métal) (Furió et al., 2000 ; Padilla et Furió-Mas, 2008). Le concept de mole fut introduit, par Ostwald, comme une masse normale dans le cadre du paradigme de l'équivalence en masse. Mais, quand le paradigme atomique, selon lequel la matière est formée d'atomes, fut introduit par Dalton, le concept de mole évolua pour désigner une quantité d'entités chimiques à l'échelle sous-microscopique. Avec cette nouvelle perception du concept de mole, les problèmes de la stœchiométrie ont été résolus et l'analyse quantitative des composés chimiques a pris un nouvel élan (Padilla et Furió-Mas, 2008). Ces liens entre le concept de mole et les autres concepts de chimie, comme la stœchiométrie, les équivalences dans un dosage, l'analyse quantitative, l'atome et autres, sont essentiels, autant dans le savoir savant que dans le savoir scolaire. L'annexe 2 montre les liens que l'enseignant doit tisser entre le concept de mole et d'autres concepts scolaires (stœchiométrie, analyse quantitative, structure de la matière etc.) et souligne l'importance d'enseigner ce concept pour faire construire à l'élève un réseau conceptuel pertinent en chimie.

L'enseignement du concept de mole n'est pas évident puisque d'une part il relie le domaine sous-microscopique abstrait au domaine macroscopique observable et d'autre part il n'est pas mesurable mais calculable à partir d'autres constantes physiques. Pour surmonter ces difficultés, Furió et al. (2002) mettent l'accent sur l'utilité des analogies pour expliquer ce concept. Malheureusement, l'analogie la plus utilisée est celle des douzaines et des centaines d'objets. Kolb (1978) montre que l'utilisation de ces analogies est efficace pour aider les élèves à comparer deux quantités (exemple : 1 mol d'atomes de sodium et 1 mol d'atomes de lithium) et à comprendre le rapport stœchiométrique, mais qu'elles peuvent causer des obstacles didactiques quand vient le temps de comprendre le monde sous-microscopique. Vogel (1992) et Gorin (1994) dénoncent l'utilisation d'analogies dans lesquelles le nombre de l'ensemble est dénombrable (exemple : une douzaine), parce que les élèves risquent de croire que le nombre d'Avogadro est, lui aussi, dénombrable. À noter que plusieurs chercheurs (entre autres, Furió et al., 2000 ; Gorin, 1994 ; Vogel, 1992) considèrent que le nombre d'Avogadro est « non

dénombrable », au sens de presque impossible à compter, puisqu'il est utilisé pour des regroupements d'entités chimiques à l'échelle sous-microscopiques qui sont non observables à l'œil nu et aussi non observables à l'aide d'instruments optiques couramment accessibles. Selon ces chercheurs, il ne faut pas introduire uniquement l'aspect « nombre », puisqu'il n'aide pas l'élève à saisir le sens du concept de mole. Il est préférable d'introduire l'aspect « nombre » et l'aspect « masse » en même temps. Mais les recherches sur le sujet ne mentionnent aucune analogie qui permettrait d'introduire ces deux aspects simultanément.

L'enseignement du concept de mole risque de créer des obstacles didactiques chez les élèves (Furió et al., 2002) en provoquant des conceptions résultantes. Par exemple, étant donné qu'en physique la masse est la quantité de matière, et qu'en chimie la mole désigne une quantité de matière, l'élève risque de construire la conception que la mole est la masse. De plus, les manuels et les enseignants affirment souvent que la masse molaire est égale au nombre de masse A, ce qui laisse également croire à l'élève que A est une masse.

Un enseignement des sciences centré sur les apprentissages ne peut être efficace que si l'enseignant utilise le matériel didactique adopté avec scepticisme et vigilance, vit un changement conceptuel au sujet de méthodes traditionnelles d'enseignement et anticipe les obstacles épistémologiques et didactiques chez ses élèves. Un enseignant qui s'approprie certaines connaissances et compétences professionnelles en investissant dans des dispositifs de formation continue et de développement professionnel a plus de chances d'y parvenir.

1.8 La formation des enseignants

De nos jours, on attend de l'enseignant compétent qu'il « fasse son métier » en plaçant l'élève au centre des apprentissages et en créant pour lui un environnement propice à la construction de son propre savoir, plutôt que de simplement « faire le programme », en transférant des savoirs sans tenir compte des difficultés d'apprentissage ou du manque d'intérêt des élèves (Maulini, 2004). On dit parfois de l'enseignant compétent qu'il fait de « l'enseignement stratégique » (Blain, 1993). Selon cette perspective, l'enseignant organise ses cours selon trois orientations : une planification hiérarchique (classer le contenu selon une hiérarchie d'apprentissage et s'assurer que l'élève possède tout l'acquis nécessaire), une

planification dynamique (ne pas abandonner devant les difficultés d'apprentissage mais proposer de nouvelles situations, de exemples et des contre-exemples) et une planification interactive (faire faire aux élèves en assurant un encadrement constructif) (Maulini, 2004).

Les recherches en didactique confirment que les enseignants ont tout intérêt à repenser leurs méthodes transmissives et à acquérir les connaissances professionnelles permettant à leur pratique d'évoluer (Glaserfeld, 1994).

1.8.1 Les connaissances en acte des enseignants

La formation initiale des futurs enseignants ne leur permet pas toujours d'établir les bases d'une stratégie de développement professionnel. En effet, plusieurs maîtres en formation modèlent leurs pratiques sur celles des enseignants rencontrés pendant leurs stages et perdent de vue les principes acquis durant les cours de pédagogie et de didactique de leur formation initiale (Hattie, 2009 ; Minier et Gauthier, 2006). Pour se justifier, certains enseignants évoquent parfois un manque de maturité des élèves qui seraient, selon eux, incapables de s'investir dans la construction du savoir (Karwera, 2012). Par ailleurs, certains enseignants se méfient des perspectives constructivistes et se résignent aux méthodes transmissives promues par les manuels (Boilevin, 2013 ; Glaserfeld, 1994).

Dans un métier qui « consiste à prendre d'incessantes décisions dans l'instant, à tenir compte de multiples interactions en situation » (Astolfi et al., 2008, p. 6), le développement continu des connaissances et des compétences professionnelles est pourtant essentiel. Tavignot (1995), par exemple, a noté qu'au moment de la planification, les enseignants compétents ne font pas toujours une transposition didactique adéquate de certaines notions mathématiques mais qu'ils améliorent rapidement cette transposition en salle de classe, au fur à mesure qu'ils s'adaptent aux besoins de leurs élèves. Toutefois, Legendre (1994) confirme que les pratiques d'enseignement dépendent des savoirs et des compétences de l'enseignant ; Talbot (2012) signale que ces pratiques ne peuvent pas répondre à des méthodes systématiques transférées en cours de formation mais qu'elles doivent s'ajuster au contexte. Plusieurs chercheurs (Morgue, 2003a/ 2008 ; Porlan, Azcarate et Martin, 1998 ; Shulman, 1986) reconnaissent, de plus en plus, que l'enseignant est incapable de développer des connaissances en acte à partir de sa formation initiale et qu'il a besoin de formations plus pratiques. Dans le cadre de ces formations,

l'enseignant interagit avec sa classe et s'adapte à divers contextes, tout en gardant le contrôle sur le contenu pédagogique et didactique proposé à ses élèves. Le développement des connaissances et des compétences professionnelles, dans les programmes de formation initiale, pourrait donc être amélioré (Boilevin, 2013) en réfléchissant à un volet pratique plus efficace.

Concrétiser les curriculums en des activités constructivistes centrées sur l'apprentissage n'est pas évident (Granger, 2014). L'enseignant doit faire construire un savoir qu'il ne peut pas nommer au préalable, par des moyens qu'il ne peut pas annoncer. « La situation didactique doit conduire l'élève à faire ce qu'on veut, mais en même temps, elle ne doit pas le conduire » (Brousseau, 1988, p. 16). En d'autres termes, l'enseignant doit assumer deux rôles contradictoires dans une même situation didactique : faire construire à l'élève une connaissance et contribuer à transformer cette connaissance en un schème cognitif que l'élève pourra activer dans de nouvelles situations (Brousseau, 1988). Quand il joue ces rôles, l'enseignant peut créer les conditions favorisant une dévolution et une dédidactisation du concept pour que l'élève accepte une « construction épistémologique cognitive intentionnelle » (Brousseau, 1988) des connaissances avant qu'elles ne soient institutionnalisées. Un enseignant compétent planifie des séances d'apprentissage favorisant la construction du savoir par l'élève ; il structure les activités pour atteindre des objectifs d'enseignement et réduire les difficultés du programme ; il évalue et réexamine ses stratégies (Hattie, 2009). Dans ces conditions, des connaissances sur l'histoire du concept, les étapes de sa construction et les processus de sa conversion en texte de savoir seraient essentielles pour l'enseignant parce qu'elles fournissent des modèles du cheminement intellectuel des élèves (Azcona et al., 2002 ; Furió et al., 2000 ; Padilla et Furió, 2008). Cela dit, la formation initiale des enseignants, et plus particulièrement en chimie, offre peu de notions épistémologiques et historiques au sujet des concepts à enseigner (Furió et al., 2000).

Dans les programmes centrés sur l'apprentissage, l'efficacité de l'enseignement se mesure par les performances des élèves (Gauthier et Dembélé, 2004 ; Shymansky et Kyle, 1992) et ceci particulièrement dans les milieux défavorisés (Bressoux, 2008 ; Coleman, Campbell, Hobson, Mcpartland, Mood, Weinfeld et York, 1966 ; Crahay 2000 ; Wang, Heartel et Walberg, 1993). Par ailleurs, quand un enseignant s'engage dans une démarche d'évolution de ses pratiques pédagogiques et didactiques, les apprentissages des élèves s'améliorent (Sanders et Horn, 1998). En enseignement des sciences, ce type de démarche, qui pourrait former la base d'un développement professionnel ultérieur à la formation initiale, confère à

l'enseignant les compétences qui lui permettent de susciter un développement des connaissances, des aptitudes d'argumentation et des attitudes scientifiques chez les élèves (Hofstein et Lunetta, 2004).

Selon Hashweh (1996), les conceptions des enseignants influencent leur transposition des programmes scolaires. Il ajoute que même si les manuels proposent une vision constructiviste des sciences, la majorité des enseignants en possèdent une vision positiviste traditionnelle. Kind et Kind (2011) soulèvent une problématique plus profonde : Un peu partout dans le monde, au secondaire, les disciplines scientifiques sont regroupés dans une même discipline appelée « science et technologie » mais les enseignants n'ont souvent pas été bien formés dans toutes les disciplines scientifiques. Kind et Kind (2011) montrent que l'enseignement d'une discipline qui n'est pas la spécialité de l'enseignant est plus fragile que celui de la discipline principale de leur formation scientifique. En chimie, si cette discipline n'est pas leur spécialité, les enseignants ne possèdent pas les SMK (*Subject Matter Knowledge*) qui englobe les modèles, les savoirs, les méthodes et les approches permettant de l'enseigner correctement.

La formation des enseignants fait partie des intérêts de recherche importants en didactique. L'étude de la formation s'effectue particulièrement dans le cadre de recherches de développement. Par exemple, dès 1993, Joshua et Dupin se sont interrogés sur la possibilité de remplacer des rapports à d'anciens savoirs, souvent devenus des obstacles, par des rapports à des savoirs nouveaux en stimulant le développement des connaissances professionnelles des enseignants. À noter que le « rapport à » est selon Charlot « une relation de sens, et donc de valeur, entre un individu (ou un groupe) et les processus ou produits de savoir » (Kalali, 2007). Plus récemment, des méthodes de recherche comme « l'ingénierie didactique » et le *Design Based Research* ont permis le développement de divers dispositifs de formation des enseignants.

1.8.2 Des dispositifs de formation pour le développement des pratiques professionnelles

Plusieurs recherches ont étudié l'impact de divers dispositifs de formation sur le développement des pratiques professionnelles. De façon générale, dans ce type de recherche, rendre les pratiques « intelligibles » consiste souvent à identifier et à confronter trois types

d'informations : la perception des pratiques, les représentations et les pratiques effectives (Bru et Talbot, 2001, p. 24).

Par exemple, Brownlee, Dart, Boulton-Lewis et McCrindle (1998) ont mené une recherche auprès de six enseignants qui devaient appliquer en classe des notions théoriques acquises au cours de leur formation initiale et partager leurs pratiques en adoptant des démarches réflexives. En plus, des jeux de rôles avaient lieu durant les rencontres afin de simuler des situations d'enseignement et d'apprentissage qui étaient plus tard discutées et critiquées. Les enseignants ont confronté leurs représentations pré-expérience théoriques à leurs représentations post-expérience issues des pratiques et ont constaté un développement de leurs pratiques professionnelles. Chacun devait tenir un journal de bord pour noter ses convictions, ses représentations, ses actions, ce qui a favorisé la métacognition, l'évaluation et la décision dans l'action de chaque enseignant. Une complexification de certaines conceptions naïves des enseignants en des connaissances déclaratives, procédurales et métaprocédurales a également été notée.

Akerson et Hanuscin (2007) ont mené une recherche de développement professionnel auprès d'enseignants du primaire qui avaient un rapport négatif aux sciences et à l'enseignement des sciences. Les enseignants ont suivi une formation basée sur le principe de l'homomorphisme, principe selon lequel les situations d'enseignement et d'apprentissage sont semblables à celles que les enseignants peuvent proposer à leurs élèves et se déroulent dans un environnement similaire (Trudel et Métioui, 2010). Suite à cette formation, les chercheurs ont constaté un changement dans les conceptions et les pratiques des enseignants. Par exemple, plusieurs enseignants ont réalisé que les théories scientifiques ne sont pas des vérités immuables, que le questionnement et l'exploration sont essentiels pour un apprentissage efficace, que la distinction entre le temps d'enseignement et le temps d'apprentissage est importante et que les compétences des élèves se développent à travers des activités conçues selon une approche constructiviste.

Doyon, Pruneau et Langis (2010) ont accompagné des enseignants dans la construction de leurs propres stratégies d'enseignement du phénomène des changements climatiques. La formation était animée par des personnes spécialisées en environnement et en éducation relative à l'environnement. Durant la formation, deux types d'activités étaient offertes : des activités de transmission et de construction des connaissances ainsi que des activités pratiques permettant

une grande implication sur les plans cognitif et affectif. Les enseignants ont interagi au sujet des défis qu'ils devaient surmonter et de leur expérience avec les élèves, en salle de classe. Les chercheurs ont constaté qu'une interaction continue favorise la cogestion, la coréflexion et la coévaluation et que l'enthousiasme et l'engagement des enseignants se transmettent implicitement aux élèves. Comme l'avait montré Duit (2007), un investissement dans la recherche, une analyse des contenus et une évaluation de l'efficacité des activités se sont produits, ce qui a favorisé le développement professionnel des enseignants.

Trudel et Métioui (2010) ont planifié une formation visant à ce que de futurs enseignants intègrent la stratégie d'enquête scientifique en physique. Durant cette formation, un contenu disciplinaire a été structuré et les enseignants se sont engagés dans des activités identiques à celles qu'ils devaient éventuellement animer dans leur classe. Une évolution des pratiques favorisant un apprentissage efficace a été constatée.

L'utilisation des pratiques sociales de référence peut limiter l'effet de la décontextualisation, de la dogmatisation et de la dépersonnalisation (Thouin, 2017a). De même, Martinand (1985) a proposé qu'une proximité entre les pratiques sociales de référence et les pratiques familières des élèves pourrait avoir un impact positif sur la motivation de ces derniers et sur le degré de signification des apprentissages scolaires réalisés. Dans ce contexte, Granger (2014) a montré qu'il était possible d'engager les enseignants dans des activités de type constructiviste en reliant le savoir à enseigner à des pratiques de références culinaires. L'homomorphisme entre les activités de la formation et les activités que les enseignants ont proposées à leurs élèves a provoqué, chez les enseignants, une meilleure appréhension des perspectives constructivistes de l'enseignement. La transposition de ces pratiques dans leur classe a augmenté la motivation et l'engagement des enseignants, surtout parce qu'ils ont noté une augmentation de l'efficacité des apprentissages. Toutefois, le chercheur a relevé aussi certaines limites de cette pratique. Par exemple, l'engagement de tous les enseignants dans des formations continues visant de telles démarches didactiques n'est pas toujours possible. De plus, le matériel et les ressources humaines qui facilitent la réalisation d'activités de type constructiviste ne sont pas nécessairement disponibles. La logistique de l'école et du milieu scolaire pourrait donc être remise en question si l'on souhaite faciliter de telles activités de formation (Philippe, 2010).

Pendant leur formation initiale, les enseignants développent parfois des conceptions

naïves au sujet des pratiques d'enseignement. Par exemple, la majorité des enseignants pratiquent un enseignement déductif plutôt traditionnel (Rocard, Csermely, Jorde, Lenzen, Walberg-Henriksson et Hemmo, 2007). De plus, bien que les démarches d'investigation recommandées dans les recherches en sciences de l'éducation (Morge et Boilevin, 2007) soient reconnues pour leur efficacité (Minner, Levy et Century, 2010), les enseignants se méfient des perspectives constructivistes dont elles découlent. L'engagement des enseignants dans des formations professionnelles peut créer et maintenir la dévolution en créant un environnement d'accompagnement professionnel et en favorisant l'acquisition implicite de « connaissances en acte » (Bru et Talbot, 2001, p. 20) à travers des activités ancrées dans leurs pratiques. Les enseignants qui sont accompagnés pour développer des pratiques innovantes craignent moins les problèmes de perte de temps, de gestion de classe ou d'attitude des élèves (Calmettes, 2008 ; Monod-Asaldi, Prieur, Vince, Fontanieu et Perret, 2011). Ainsi, il y a avantage à penser la formation continue comme « un moyen d'intervention efficace sur les systèmes d'enseignement » où « la position professionnelle est remodelée » (Mercier, 2002, p. 151) selon les attentes des curriculums et les résultats des recherches en didactiques.

1.9 La pertinence scientifique et sociale de la recherche

Aucune recherche d'une ampleur et d'une durée relativement réduites ne peut porter, de façon exhaustive, sur tous les problèmes abordés dans cette problématique, soit la culture scientifique et technologique de la population libanaise, l'enseignement des sciences à l'école, les programmes d'études, les manuels scolaires, les problèmes d'apprentissage des élèves ainsi que les lacunes dans la formation initiale et la formation continue des enseignants. Tous ces problèmes sont toutefois des éléments contextuels essentiels de cette recherche.

Pour que cette recherche demeure réaliste, et pour que ses retombées soient les plus utiles que possible, l'accent a été placé sur des activités de formation continue des enseignants et sur l'impact de ces activités sur l'enseignement et l'apprentissage de la chimie, et plus précisément du concept de mole, au secondaire et au Liban.

Sur le plan scientifique, cette recherche est pertinente d'abord parce que les recherches en didactique de la chimie sont moins nombreuses que les recherches en didactique de la

physique et de la biologie, mais surtout parce que les recherches portant sur le concept de mole, un concept nœud en chimie, le sont encore moins. Dans ce domaine, il reste donc encore un grand nombre de questions sans réponse.

Sur le plan social, cette recherche pourrait avoir comme retombée de faire prendre conscience aux enseignants, mais aussi aux décideurs du milieu scolaire, de l'importance de la formation continue des enseignants et d'une attitude plus positive envers un développement professionnel et disciplinaire qui devrait se poursuivre durant toute la carrière d'un enseignant.

1.10 L'objectif général de recherche

Les formations qui respectent le principe de l'homomorphisme (similitude entre la formation donnée aux enseignants et l'enseignement fait par les enseignants avec leurs élèves) réussissent habituellement à motiver les enseignants engagés dans un parcours de professionnalisation. La présente recherche vise l'engagement des enseignants dans une formation professionnelle, centrée sur ce principe, qui porte sur l'enseignement et l'apprentissage du concept de mole.

L'objectif général de la recherche est donc :

Étudier l'impact d'une formation collaborative, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur l'évolution de leurs connaissances et compétences professionnelles en enseignement de la chimie et, plus particulièrement, sur l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage du concept de mole.

2 Cadre théorique

2.1 Introduction

« Enseigner, c'est savoir s'adapter et c'est dans le même temps résister » (Astolfi, 2014, p. 123). En effet, le seul fait de s'adapter risque de ne pas permettre de changements conceptuels chez les élèves ; le seul fait de résister risque de déstabiliser les élèves et de réduire l'efficacité de l'enseignement. Enseigner, c'est aussi développer un lien particulier avec la discipline, lien qui est en grande partie basé sur la pratique du « terrain » (Philippe, 2010, p. 53). Ainsi, chaque enseignant « dramatise » le contenu disciplinaire d'une façon très singulière qui témoigne de son histoire personnelle et professionnelle (Philippe, 2010).

Par ailleurs, dans les programmes centrés sur l'élève, l'efficacité de l'enseignement est souvent associée à celle de l'apprentissage. L'enseignant doit engager et impliquer l'élève dans son apprentissage en proposant toujours des activités nouvelles, des situations « décoiffantes » et des questions vives (Astolfi, 2014). Les connaissances et les compétences professionnelles développées par l'enseignant au fil des années d'expérience, des activités de formation continue et d'un contact régulier avec les résultats des recherches en sciences de l'éducation rendent ces activités d'enseignement et d'apprentissage de plus en plus efficaces.

Ce chapitre présente d'abord les concepts didactiques relatifs à l'apprentissage et l'enseignement des sciences, et plus particulièrement de la chimie et du concept de mole, et aborde ensuite le développement professionnel des enseignants.

2.2 L'apprentissage des sciences, de la chimie et du concept de mole

Au secondaire, le rapport d'un élève aux sciences dépend en partie de son parcours scolaire au primaire (Thouin, 2017 a). En effet, au primaire, le développement de compétences de résolution de problèmes et de communication ainsi que l'acquisition de savoirs favorisant le développement d'habiletés (comme l'observation, la formulation d'hypothèses, et l'interprétation) et d'attitudes (comme la curiosité et la minutie) conduisent à des processus

cognitifs d'apprentissage efficaces et à un rapport positif à la discipline et permettent à l'élève de mieux s'investir dans son apprentissage au secondaire. Un processus cognitif peut être considéré comme la démarche cognitive entreprise par l'élève pour répondre à une famille de situation ; il témoigne de schèmes cognitifs pertinents. Ces derniers sont « le fonctionnement cognitif de l'élève [qui] comporte des opérations qui s'automatisent progressivement et des décisions conscientes qui permettent de tenir compte des valeurs particulières des variables de situation » (Vergnaud, 1991, p.137). Par exemple, dans le cas du concept de mole, une explicitation du calcul mené en montrant les variables et les unités (par un texte ou un tableau de proportionnalité) pourrait confirmer une compréhension approfondie du calcul mené. Si cette manifestation se répète chez l'élève à travers une famille de situation, il pourrait témoigner d'un processus cognitif bien construit.

Le rapport de l'élève au savoir dépend aussi des méthodes d'enseignement (Bachtöld, 2012). En effet, la motivation dans son apprentissage en sciences pourrait être maintenue au moyen d'activités intellectuelles dans le cadre desquelles les concepts sont problématisés. Idéalement l'élève, encadré par l'enseignant, réalise les solutions, construit les concepts et se crée graduellement une représentation cohérente et scientifique de son environnement (Bachelard, 1938 ; Hashweh, 1996 ; NRC, 1996 ; Schweingruber, Quinn, Keller et Pearson, 2013). Cela dit, le parcours d'apprentissage au secondaire présente plusieurs difficultés, notamment en raison de la complexité de certains éléments du contenu et de leur degré d'abstraction. Cette section brosse un portrait des concepts relatifs à l'apprentissage des sciences, de la chimie et du concept de mole et présente les résultats des principales recherches dans ces domaines.

2.2.1 L'apprentissage des sciences

Les sciences permettent de décrire, d'expliquer et de prédire des phénomènes. La chimie permet de décrire et d'expliquer la constitution, les propriétés et les transformations de la matière et de prédire les réactions chimiques (Castro, 2006). Évidemment, il existe toutefois un écart entre le savoir savant, le savoir à enseigner, le savoir enseigné et le savoir acquis par l'élève.

Les savoirs et les connaissances

Le savoir savant est transposé par trois environnements : la société (niveau macro), l'institution (niveau méso) et la classe (niveau micro). Quand l'élève s'approprié ces savoirs, ils deviennent des connaissances qui doivent toutefois se déployer en situation réelle pour être véritablement acquises (Conne, 1992 ; Glaserfeld, 1994). Ainsi, « lorsque le sujet reconnaît le rôle actif d'une connaissance sur la situation, pour lui, le lien inducteur de la situation sur cette connaissance devient inversible, il sait » (Conne, 1992, p. 225). En d'autres termes, la connaissance est le résultat d'une interaction entre l'élève et la situation qui met en jeu un savoir (Conne, 1992). Loin d'être statique, cette interaction est dynamique : la situation induit une connaissance et la connaissance agit pour transformer la situation (Conne, 1992).

La classification du savoir en science, et plus particulièrement en chimie, distingue le « savoir que », le « savoir comment » et le « savoir quand et comment ». Un processus cognitif, subjectif et personnel transforme ces savoirs respectivement en connaissances déclaratives, connaissances procédurales et connaissances conditionnelles ou méta procédurales (Cormier, 2014 ; Hattie, 2009). Un processus cognitif sera aussi activé quand l'élève mettra à profit ces connaissances qui deviennent ses savoirs. D'autres classifications existent, comme celle élaborée par Jansoon, Coll et Somsook, (2009) : les connaissances déclaratives, les connaissances procédurales et symboliques, ainsi que les connaissances analogiques et logiques.

Au cours des transformations subjectives du savoir par l'élève, des structures cognitives s'installent sans toujours créer des liens entre les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales. Ces liens permettraient pourtant d'améliorer le rapport des élèves au savoir.

Le rapport des élèves au savoir

Trop souvent, et même dans les cours de sciences qui traitent de l'univers matériel, les élèves s'ennuient à l'école puisqu'ils « ne parlent pas avec la matière » (Astolfi, 2014, p. 33). Ils ne retrouvent plus le plaisir de la connaissance, de l'épanouissement personnel et de l'ouverture que favorise le savoir. Ils entretiennent plutôt un rapport « utilitariste » avec le savoir (Astolfi, 2014 ; Conne, 1992) et s'intéressent à ce qui leur permet de réussir les examens et à ce qu'ils peuvent exploiter dans leur vie quotidienne. Cet utilitarisme peut être illustré dans la dualité objet/outil où l'objet est culturel, social et situé dans le savoir savant alors que l'outil est

en situation. Pour fonctionner, la transposition du savoir scientifique doit donc sauvegarder la nature de ce savoir, tout en montrant son utilité dans les pratiques sociales quotidiennes, en contrôlant le couple « connaissance-situation » (Conne, 1992).

Dans trop de classes, les savoirs enseignés par le maître sont impersonnels, sans trace de leur genèse et sans référence à leurs usages sociaux, alors que les connaissances de l'élève, qui sont la face subjective du savoir, se retrouvent engluées dans l'ensemble de ses structures mentales et de ses conceptions alternatives (Perrenoud, 1998). Astolfi et al. (2008) ajoutent que l'appropriation du savoir pour en faire des connaissances est une organisation subjective qui dépasse la mémorisation et qui exige plus qu'une simple verbalisation des informations. Le rapport de l'élève à un savoir dépend des approches utilisées pour développer les processus cognitifs de l'élève lui permettant de s'approprier ce savoir.

La chimie est constituée de savoirs scientifiques très abstraits, puisqu'ils associent le langage naturel, le langage symbolique et le langage graphique en intégrant les domaines sous-microscopique, macroscopique et symbolique. Cela en fait, pour de nombreux élèves, la science la plus difficile à maîtriser.

Les fautes de raisonnement

Astolfi (2014) distingue le cognitif du conceptuel : alors que le premier évoque les processus mentaux du raisonnement ou de la logique, le deuxième se rapporte aux savoirs disciplinaires constituant un concept. Mais les deux interagissent d'une façon dialectique : les concepts ne peuvent être acquis, de façon raisonnée, que si le conceptuel est développé ; en même temps, leur acquisition favorise le développement du raisonnement et de la logique. Kuhn (1972) distingue les fautes conceptuelles des fautes de raisonnement. Un des objectifs de cette thèse est d'aider les enseignants à réduire les fautes conceptuelles, causées par des conceptions alternatives, des obstacles épistémologiques ou des obstacles didactiques, qui pourraient générer des raisonnements inappropriés.

Cormier (2014) propose quatre modèles de raisonnement chez l'élève, pour expliquer la nature de leur réponse (correcte ou fautive) :

- Modèle A : Concepts corrects – *liens corrects* --- réponses correctes
- Modèle B : Concepts + conceptions → réponses incorrectes

- Modèle C : Manque de concepts → réponses incorrectes
- Modèle D : Concepts corrects – *liens incorrects*--- réponses incorrectes

Dans le cadre de la présente recherche, une des finalités de la formation donnée aux enseignants était de favoriser la construction du modèle A chez les élèves. Puisque cette formation était basée sur le principe de l'homomorphisme (similitude entre la formation donnée aux enseignants par les formateurs et l'enseignement dispensé aux élèves par les enseignants ; voir Figure 7) et comme le montre l'analyse des résultats de la recherche explicités au chapitre 5, les enseignants ont vécu un changement conceptuel leur permettant d'améliorer leur modèle mental au sujet du concept de mole avant de faire construire leur propre modèle aux élèves.

Les domaines du savoir et le contenu disciplinaire abstrait font de l'enseignement de la chimie une tâche exigeante et de son apprentissage une finalité difficile à atteindre. Ces difficultés d'enseignement et d'apprentissage sont examinées pour le concept de mole.

2.2.2 L'apprentissage de la chimie

Les savoirs de la chimie se caractérisent par une dualité problématique : ils appartiennent à deux domaines dont les échelles sont très différentes : le sous-microscopique et le macroscopique. À ces deux domaines principaux s'en ajoute un troisième, le symbolique. Ces trois domaines forment les sommets d'un triangle qui illustre les relations et les imbrications entre eux (Johnstone, 1993). C'est d'ailleurs en grande partie l'établissement de liens entre ces domaines qui pose problème dans l'enseignement et l'apprentissage de la chimie (Jansoon, Coll et Samsook, 2009 ; Levy et al., 2004). Par exemple, les enseignants expliquent souvent des phénomènes et des concepts à l'échelle macroscopique sans créer de ponts avec l'échelle sous-microscopique ou avec le symbolique (Jansoon, et al., 2009). Les conceptions alternatives des élèves relatives à la nature de la matière et à ses propriétés résistent à un tel enseignement et risquent de mener l'apprentissage de la chimie dans une impasse. Ces problèmes dans l'enseignement de la « relation du triplet » (Gilbert et Treagust, 2009) créent les obstacles d'apprentissage dans plusieurs champs spécifiques de la chimie (Peterfalvi, 1997). En fait, l'enseignant possède des modèles mentaux à partir de sa perception des trois domaines du savoir en chimie et des liens entre eux. Ces modèles orientent son enseignement et son discours et

déterminent la construction des modèles mentaux des élèves (Jansoon, et al., 2009). L'amélioration des modèles mentaux des enseignants pourrait être un moyen de favoriser les apprentissages des élèves.

Pour sa part, Talanquer (2011) propose une autre typologie du savoir en chimie. Il distingue les domaines sous-atomique, moléculaire, supramoléculaire, multi-corpusculaire, sous-microscopique et macroscopique. De plus, ces domaines doivent être abordés de trois façons : par des modèles, par de la visualisation et par de l'expérimentation. Cette typologie permet elle aussi de comprendre qu'un enseignement purement transmissif présente plusieurs lacunes, puisque la visualisation nécessite du matériel de manipulation et des ressources informatiques et que l'expérimentation nécessite des laboratoires bien équipés.

Comme toute science, la chimie comporte des concepts scientifiques qui se déclinent, dans les programmes, en « concepts scolaires ». Reuter, Cohen-Azria, Daunay, Delcambre et Lahanier-Reuter (2013) décrivent les concepts scientifiques en montrant qu'ils « renvoient à des unités du discours théorique caractérisées, entre autres, par leur mode de construction, leur définition, le fait qu'ils fonctionnent dans un réseau et qu'ils sont des outils du travail théorique » (p. 33), tandis que, pour leur part, les concepts scolaires sont construits et travaillés dans l'espace scolaire. Reuter reprend de Vergnaud la définition du concept scolaire par les trois ensembles : « 1) l'ensemble des situations qui lui donnent du sens ; 2) l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement ; 3) l'ensemble des invariants opératoires » (p. 35). Le premier ensemble exige des connaissances sur l'histoire du concept, le contexte de sa création, les liens avec d'autres concepts, les changements qu'il a provoqués et son évolution socio-historique puisque la compréhension d'un concept ne se limite pas à le définir (Furió et al., 2000). Le deuxième ensemble exige une gestion méticuleuse du langage, pour éviter des erreurs sémantiques où les domaines du savoir se confondent, les expressions sont inappropriées et l'ensemble du discours manque de cohérence (Pekdad et Azizoglu, 2013). Le troisième ensemble met en valeur l'interaction du langage mathématique, et l'importance d'éviter de réduire l'enseignement à des algorithmes employés de façon automatique (Fang, Hart et Clarke, 2016).

Ces problèmes d'enseignement sont particulièrement évidents dans le cas du concept de mole. En effet, les élèves n'arrivent pas à identifier la nature conceptuelle du concept

puisqu'ils sont incapables d'en saisir une définition pertinente, de bien distinguer ses aspects qualitatifs et quantitatifs et de s'y retrouver dans un lexique associé souvent sibyllin. Ils arrivent parfois à effectuer des calculs en appliquant des algorithmes, mais cela n'indique pas nécessairement qu'ils comprennent la nature de ce concept (Pekdag et Azizoglu, 2013). Malheureusement, l'enseignement de la mole, tel que planifié dans les manuels scolaires, peut facilement générer des obstacles didactiques puisque : 1) les modèles théoriques sont imposés et non construits ; 2) certaines notions sont vulgarisées au point de les rendre simplistes ; 3) le langage n'est pas précisé ; 4) les analogies proposées appartiennent au domaine macroscopique (les douzaines et les dizaines d'objets dénombrables). En d'autres termes, un enseignement qui ne tient pas compte de l'abstraction du domaine sous-microscopique et des liens avec le domaine symbolique ne peut pas conduire à des représentations correctes chez les élèves (Cormier, 2014).

Faire construire des savoirs par l'élève et développer chez lui un raisonnement scientifique dépendent d'un enseignement bien planifié. Cet enseignement ne peut réussir s'il ne tient pas compte des conceptions alternatives des élèves et n'anticipe pas les obstacles épistémologiques et didactiques qui risquent de se manifester.

Les conceptions

Les conceptions sont le plus souvent des « couennes dures » (Potvin, 2011, p. 103) qui constituent des obstacles à l'apprentissage (Astolfi et al., 2008, p. 121). Les chercheurs, comme Astolfi et al. (2008), Cormier (2014), Potvin (2011) et Thouin (2017 a/2014), s'entendent pour dire que ces conceptions sont efficaces dans certains contextes et incohérentes dans d'autres, qu'elles persistent si elles ne sont pas repérées et remises en question, qu'elles résistent à l'enseignement direct et qu'elles s'adaptent facilement aux situations. Certains chercheurs associent les conceptions à « des représentations internes » (Levy et al., 2004) qui sont « à la fois comme un point d'équilibre de la structure cognitive de l'individu à un moment donné (équilibre qui aura à évoluer au cours des apprentissages ultérieurs), mais aussi comme une « tâche intellectuelle » requise face à un problème scientifique à résoudre » (Astolfi et Develay, 1989).

La didactique considère que l'élève n'est pas une « tabula rasa » ; elle reconnaît que l'élève construit ses connaissances à partir de ses conceptions. Ce « déjà connu » (Astolfi, 2008)

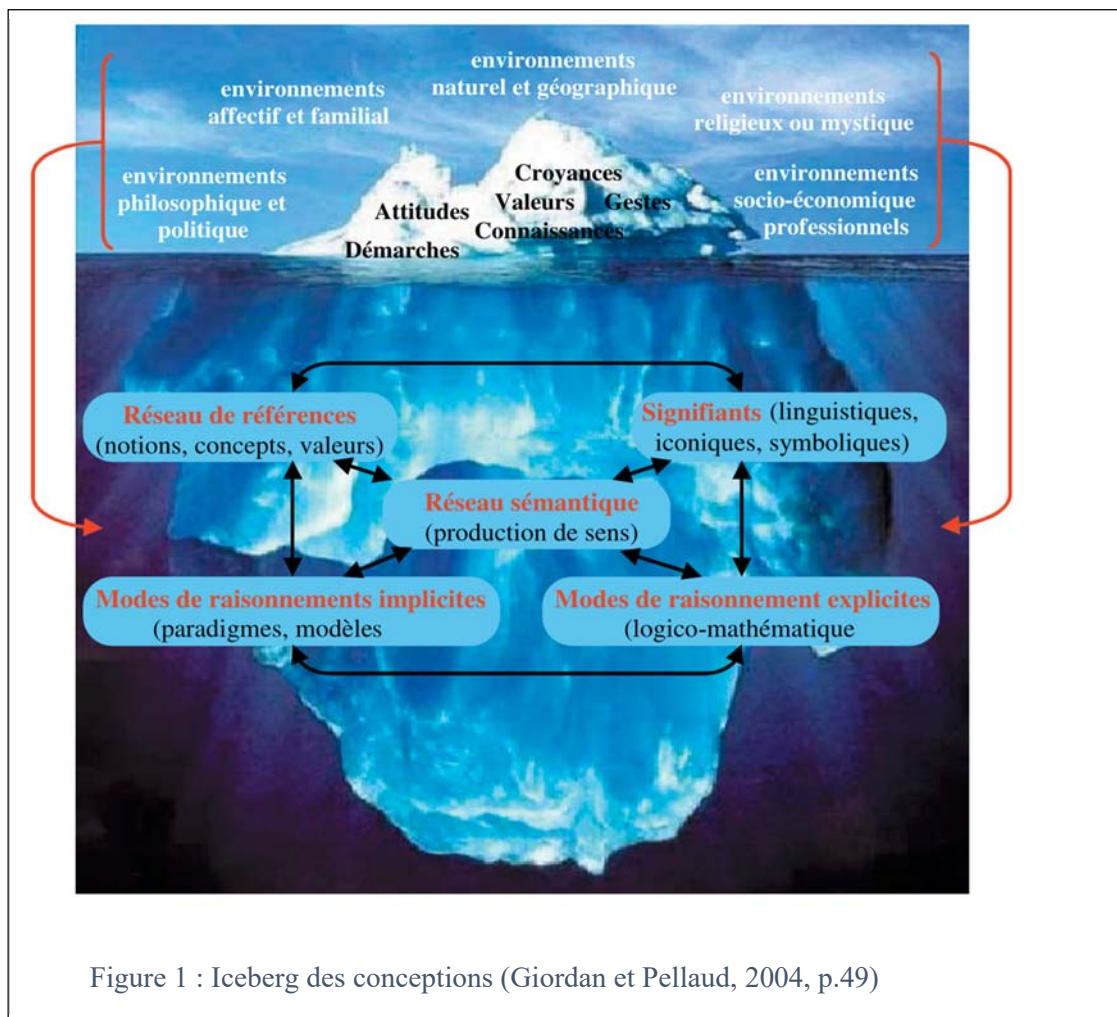
risque de former des « noyaux durs » constituant des obstacles à l'apprentissage quand il est erroné (Barlet et Plouin, 1997).

Les conceptions sont des représentations liées à des notions déterminées. Elles possèdent un double statut : d'une part, elles représentent un savoir parfois très différent du savoir savant ; d'autre part, elles sont plausibles car elles fournissent des explications fonctionnelles pour l'élève (Astolfi et Peterfalvi, 1993).

Ces conceptions sont justifiées et stabilisées par un obstacle épistémologique qui se déploie dans un contexte plus général et plus profond. Un même obstacle pourrait justifier plusieurs conceptions, plusieurs obstacles pourraient maintenir une conception et certains obstacles pourraient créer un nœud interdisciplinaire (Astolfi et Peterfalvi, 1993). C'est le cas du concept de mole dont l'évolution socio-historique explique de nombreuses conceptions chez les enseignants et chez les élèves.

Les origines des conceptions sont diverses : le sens commun, les impressions sensorielles, le langage courant, la généralisation, le lien direct entre deux phénomènes, les exemples erronés, les croyances, les anciennes pratiques, etc. (Thouin 2014/2015/2017a). Jansoon et al. (2009) considèrent les conceptions comme des modèles mentaux provenant de la perception, de l'imagination ou de la compréhension d'un discours. Dans ce dernier cas, le discours de l'enseignant, véhiculant ses propres conceptions ou vulgarisant le langage scientifique au point de le banaliser ou de le confondre avec le vocabulaire d'une autre discipline, pourrait être la source de conceptions alternatives et même d'obstacles didactiques.

Giordan et Pellaud (2004) modélisent les origines des conceptions et leurs effets sur les processus d'apprentissage par l'« iceberg des conceptions » (figure 1). L'élève baigne dans un environnement social, familial et scolaire qui façonne chez lui des idées qui pourraient faire obstacle à son appropriation d'un savoir ou d'un savoir-faire scientifique, et même qui oriente « son écoute ou son approche ». L'enseignant a donc avantage, dans la mesure du possible, à construire des séances d'apprentissage en se basant sur les conceptions alternatives qui ne sont pas totalement fausses et qui peuvent servir d'adjuvants (aide à l'apprentissage). Cela implique qu'il puisse ajuster ses stratégies d'enseignement et développer ses pratiques professionnelles pour rendre l'apprentissage des élèves plus efficace (Giordan et Pellaud, 2004).



Les conceptions sont soutenues par trois types d'obstacles : les obstacles ontogéniques (propres au développement de l'élève), les obstacles épistémologiques (propres au savoir) et les obstacles didactiques (propres au matériel didactique et au discours de l'enseignant) (Brousseau, 2010). Dans le cas du concept de la mole, les obstacles sont de tous ces types. Certains sont psychogénétiques parce qu'à la fin du secondaire, peu d'élèves ont développé le stade formel leur permettant d'appréhender des concepts abstraits (Goodstein et Howe, 1978 ; Herron, 1975). D'autres sont épistémologiques puisque l'évolution socio-historique du concept n'est pas linéaire. Le concept a été défini selon le paradigme de l'équivalence en masse et il a été adopté par la communauté scientifique sous le paradigme de la théorie atomique. En plus, les définitions se sont multipliées et « mole » est passée d'un concept à une unité de la quantité de matière (Azcona et al., 2002 ; Padilla et Furió-Mas, 2008). D'autres obstacles sont didactiques (Azcona

et al., 2002 ; Furió-Mas et al., 2002 ; Gabel et Bunce, 1994). Leur gravité et leur nombre pourraient être fonction de la formation (initiale et continue) des enseignants. Ces obstacles didactiques remettent en question le contrat didactique et le rapport de l'enseignant au savoir, puisqu'ils sont dus à des choix pédagogiques et didactiques inappropriés, qui entraînent des apprentissages erronés chez l'élève. Les origines des obstacles didactiques peuvent être, par exemple, des erreurs sémantiques qui glissent dans le discours (Pekdag et Azizoglu, 2013), un enseignement mal planifié où l'aspect quantitatif est abordé de façon purement algorithmique (Fang, Hart et Clarke, 2016 ; Moss et Pabari, 2010 ; Pekdag et Azizoglu, 2013), ou un enseignement basé sur un matériel didactique dont les recherches, telles celles menées par DeBièvre (2014), Fang et al. (2016), Furió et al. (2000) et Padilla et Furió-Mas (2008), confirment les nombreuses lacunes. Dans la présente recherche une attention particulière est accordée aux obstacles didactiques.

Le concept de mole et les obstacles didactiques

Tel que déjà présenté, les domaines du savoir en chimie, le macroscopique, le sous-microscopique et le symbolique sont problématiques en enseignement et en apprentissage. Ces domaines s'amalgament dans tous les concepts de la chimie. La relation du triplet (Gilbert et Treagust, 2009), qui désigne la relation créée entre ces trois domaines, est problématique dans l'apprentissage de la chimie et plus particulièrement celui du concept de mole. Un enseignement efficace du concept de la mole tient compte de cette relation.

La transposition didactique du concept de mole dans les manuels est contestable (Brousseau et Vazquez-Abad, 2005 ; Fang et al., 2016 ; Furió et al., 2000 ; Guinta, 2015 ; Padilla et Furió-Mas, 2008 ; Pekdag et Azizoglu, 2013). L'analyse des manuels scolaires présentée dans la problématique en est une bonne indication. Elle confirme que l'enseignant ne peut pas tellement se fier au matériel didactique disponible. Par ailleurs, la formation initiale de l'enseignant, où le concept de mole est souvent absent (ou abordé très rapidement), ne lui permet pas de critiquer et d'améliorer le contenu des manuels (Furió et al., 2000). Par conséquent, l'enseignement risque d'échouer si l'enseignant ne s'engage pas dans une formation continue développant une épistémologie du concept et des approches d'enseignement constructivistes (Azcona et al., 2002 ; Furió et al., 2000 ; Padilla et Furió Mas, 2008).

Les multiples définitions de la mole ont créé des confusions chez les enseignants et les élèves. Trois sens du mot mole se retrouvent dans ces définitions : 1) C'est une masse (molécules-grammes ; atomes-grammes) ; 2) Une portion d'une substance, dans ce cas la mole est exprimée par unité de masse ; 3) Un nombre, dans ce cas la quantité de substance est proportionnelle à un nombre spécifique d'entités chimiques (Kolb, 1981). Mais Potvin (2019, p. 19) propose que « la *définition* des choses puisse pratiquement constituer l'*unité de base* fondamentale de la structuration du propos de l'enseignant de science et de technologie ». Aider l'enseignant à construire une définition pertinente ou à en choisir une serait incontournable pour un enseignement efficace.

L'expression « quantité de matière », associée à la mole, est controversée puisqu'elle évoque la matière observable à l'échelle macroscopique et ne peut évoquer sa structure discontinue à l'échelle sous-microscopique. Certains chercheurs, convaincus de la confusion que cette expression peut causer, ont soutenu la recommandation du ICTN du IUCPA de changer le nom du concept et de proposer des redéfinitions. Ainsi, Nelson (1991) propose « quantité de substance » ou « nombre de particules ». Baranski (2012) propose « collection ou quantité de microentités ». De Bièvre (2013 /2014) soutient la proposition de Rocha-Filho (1990/ 2011) du terme « Numerosity » pour mettre en valeur le fait que la matière est discontinue et qu'elle est composée d'entités chimiques. Cela dit, les enseignants, qui ne se préoccupent pas tellement du sens réel de la définition de la mole, se contentent de calculer des « nombres de moles » (De Bièvre, 2014 ; Guinta, 2015). Bien que cette expression ait été utilisée jusqu'en 1969, elle est actuellement refusée car l'unité (ici la mole) se retrouve dans le nom de la quantité calculée (Guinta, 2015). Mais la confusion entre mole et masse pourrait se trouver dans l'origine même de l'expression « quantité de matière », puisque Ostwald, en 1900, avait introduit le terme mole pour désigner un « Gram Molecular Weight ». L'expression « quantité de matière » ne semble pas être pertinente pour favoriser un apprentissage efficace, mais son remplacement n'est pas évident.

Comme dans toute science, l'apprentissage de la chimie dépend des acquis en mathématiques : d'une part, les mathématiques constituent la discipline principale pour initier le développement de l'intelligence logico-mathématique qui favorise le développement de la pensée formelle ; d'autre part, les concepts de chimie exigent généralement l'acquisition de

concepts mathématiques pour mener correctement les calculs ou tracer et analyser des graphiques.

Charnay et Mante (1991) analysent le sens de l'erreur en mathématiques selon les perspectives de l'enseignement. Dans les perspectives traditionnelles de l'enseignement, les erreurs en mathématiques sont interprétées selon deux approches. La première considère l'erreur comme une anomalie chez l'élève remettant en question son travail, son attention et ses capacités intellectuelles. La deuxième considère que, dans un apprentissage par compétences ou par objectifs, dans lequel les tâches sont subdivisées pour faciliter leur acquisition avant de les effectuer dans un contexte plus complexe, les erreurs résultent d'une mauvaise maîtrise des connaissances déclaratives et procédurales ou d'une incapacité à mobiliser correctement les connaissances et d'incapacités logiques, ce qui entrave la gestion des données, leur articulation et les processus de résolution de problème.

Dans les perspectives constructivistes, les erreurs en mathématiques sont classées en trois catégories : 1) les erreurs relatives aux caractéristiques de l'apprenant (comme le développement intellectuel), 2) les erreurs relatives au rapport de l'élève au savoir (mémoire défectueuse qui provoque des lacunes d'automatisation de procédures et difficultés de gérer des activités simultanément ; conceptions alternatives) et 3) les erreurs relatives au contrat didactique et à la relation enseignant-élève (image de soi, représentations de la discipline) (Charnay et Mante, 1991). Faire réaliser à l'enseignant comment il considère les erreurs pourrait lui permettre de mieux connaître le modèle pédagogique qu'il privilégie et lui faire franchir un premier pas vers un changement de ses pratiques.

Dans le cadre de cette recherche, l'intérêt porte principalement sur les obstacles didactiques relatifs au concept de mole. Ce concept est associé à des difficultés en mathématiques telles que les calculs relatifs aux fractions, aux nombres décimaux et aux puissances de 10. Selon Brown et de Burton (1978), les erreurs des élèves en mathématiques, présentent souvent un « caractère organisé ». Leurs erreurs font système au point qu'elles sont prédictives. Les élèves inventent des règles à partir de ce qui leur a été enseigné et effectuent des calculs erronés. Par exemple, la division étant toujours associée, dans les classes du primaire, au partage ou à la distribution, l'élève construit ses propres règles dès que le dividende est égal ou inférieur au diviseur (Brun, Conne, Lemoyne et Portugais, 1994). Il s'agit d'une situation fréquente dans les calculs associés au concept de mole.

2.2.3 Le concept de mole

Un concept scientifique se construit progressivement en réponse à des questions de recherche contextualisées. Il permet d'expliquer la nature de divers objets ou phénomènes et de proposer des modèles explicatifs (Reuter et al., 2013). Il est formé d'un système d'outils théoriques cohérents, qui constituent une « trame conceptuelle » (Astolfi, 2014 ; Reuter et al., 2013) et qui fonctionnent dans un réseau dont il est un nœud. Enseigner un concept et garantir « sa force explicative » et « sa valence épistémologique » dépendent des visées des activités d'enseignement et d'apprentissage proposées (Chevallard et Joshua, 1991, p. 22).

Comme dans toute discipline, en chimie, un lexique spécifique disciplinaire a été construit par une redéfinition de mots usuels, un recyclage de mots anciens, des métaphores et un nouveau vocabulaire (Astolfi, 2014). L'annexe 2 montre que les concepts de chimie qui s'appuient sur le concept de mole forment des unités cohérentes intelligibles (Astolfi, 2014). Le concept de mole est d'ailleurs associé à des notions importantes telles que le nombre de masse de l'atome qui détermine sa masse, l'unité de masse atomique, la stœchiométrie (Dierks, 1981) et l'analyse quantitative. D'après Fang et al. (2016), le concept de mole est l'un des concepts nœuds en chimie. Un enseignement déficient et un apprentissage incomplet du concept de mole risquent d'entraîner le décrochage de l'élève puisque ces lacunes se répercutent dans la compréhension de plusieurs autres concepts qui relèvent des trois domaines (macroscopique, sous-microscopique et symbolique).

En plus des difficultés causées par la notion de modèle, par les conceptions alternatives des élèves, par les mathématiques et par les fautes de raisonnement, les difficultés d'apprentissage du concept de mole peuvent aussi être dues à la nouveauté des termes, des définitions et des symboles (Astolfi et al., 2008 ; Brousseau et Vázquez-Abad, 2005). En réalité, l'évolution socio-historique du concept, méconnue par les enseignants, est source d'obstacles épistémologiques et didactiques dont plusieurs persistent encore de nos jours (voir Tableau 1)

Évolution socio-historique du concept	Obstacles épistémologiques et didactiques résiduels
<p>1789 : Richter, un mathématicien allemand, définit le concept de stoechiométrie, en chimie, sous forme de rapport entre des masses. C'est la base du paradigme de l'équivalence en masse (Padilla et Furió-Mas, 2007).</p>	
<p>Avec les travaux de Richter, la chimie remplace l'alchimie. Des éléments chimiques sont découverts, des symboles sont donnés et des formules de divers composés sont déterminées.</p> <p>Mais le paradigme de masse n'a pas pu expliquer la différence entre un composé et une solution et non plus déterminer la formule de tous les composés (Padilla et Furió-Mas, 2007).</p>	<p>- Les confusions langagières en chimie prennent naissance à cette époque puisque les chimistes ne s'entendent pas sur le même langage. Par exemple, même de nos jours, on note des confusions entre élément, composé, corps pur et mélange (Potvin, 2019 ;Thouin, 2017a).</p>
<p>1808 : Dalton énonce la théorie atomique : la matière est formée d'atomes qui sont des entités insécables. Ce paradigme permet de distinguer les corps purs simples des corps purs composés et de déterminer avec précision la masse d'une substance. Toutefois, ce paradigme n'a aucune base expérimentale (Azcona et al., 2002 ; Vogel, 1992) et plusieurs chimistes doutent de la présence de l'atome (Vogel, 1992). La théorie de Dalton ne permet d'ailleurs pas de distinguer les atomes des molécules (Padilla et Furió-Mas, 2008).</p>	<p>- L'élève est incapable d'appréhender l'abstraction due aux deux structures distinctes, sous-microscopique et macroscopique, d'une même matière, en bonne partie parce qu'il n'a pas développé une pensée opérationnelle formelle (Herron, 1975; Goodstein et Howe, 1978 ; Potvin, 2011/2019 ;Thouin, 2017a) et les enseignants pensent rarement à démontrer la structure particulière de la matière dans une résolution de problème (mouvement de Brown).</p>

<p>1811 : Avogadro Ampère formule son hypothèse que dans les mêmes conditions de température et de pressions, deux gaz qui occupent le même volume sont formés du même nombre de molécules (Baranski, 2012 ; Buès, 2000 ; Kolb, 1978). Son hypothèse est refusée par les chimistes qui soutiennent le paradigme de l'équivalence en masse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignants et les élèves ont tendance à généraliser cette loi : un même volume correspond à un même nombre de mole quel que soit l'état physique de la matière ou, à l'inverse, à restreindre son application à l'état gazeux (Dierks, 1981).
<p>1860 : Congrès de Karlsruhe (1^{er} congrès de chimie) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - On s'entend sur une même nomenclature. - On distingue et définit l'atome et la molécule. - On adopte l'hypothèse d'Avogadro (Padilla et Furió-Mas, 2008). 	
<p>1900 : Ostwald, adepte du paradigme d'équivalence en masse, définit la mole ainsi : <i>la masse d'une substance, exprimée en grammes, numériquement égale à son poids normal</i>.</p> <p>Ostwald définit alors la mole à l'échelle macroscopique et l'applique à la stoechiométrie (Pekdag et Azizoglu, 2013).</p> <p>La traduction des travaux d'Ostwald en anglais, français et espagnol ne respecte pas le vocabulaire équivalentiste tenu par Ostwald. Dans les traductions, l'expression « <i>Normal Weight</i> » est remplacée par « masse molaire » et « <i>Union Weight</i> » par « masse atomique », ce qui pourrait montrer que les contemporains d'Ostwald n'acceptaient pas son langage (Azcona et al., 2002).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignants, et éventuellement les élèves, considèrent la mole comme l'unité d'une masse chimique qui sert à compter des entités (Furió et al., 2000). - Les enseignants, et éventuellement les élèves, confondent la masse, la masse molaire, le volume molaire et la quantité de matière (Padilla et Furió-Mas, 2008). - Les termes atome-gramme ou molécule-gramme laissent les enseignants et les élèves confondre la mole avec la masse (Padilla et Furió-Mas, 2008).

Au XXe siècle, le concept « quantité de matière » évolue puisque les chimistes ont besoin d'un nombre de particules qui permet de créer un lien entre les masses des entités et les masses à l'échelle macroscopique (Baranski, 2012 ; Padilla et Furió-Mas, 2008).

1908 : Perrin estime le nombre d'Avogadro à $6,7 \times 10^{23}$ (Levy, 2015).

1929 : On découvre les deux isotopes de l'oxygène. Les chimistes et les physiciens ne s'entendent plus sur le choix des références. Les physiciens veulent considérer l'isotope le plus abondant (O-16) et les chimistes veulent considérer l'élément oxygène avec sa masse moyenne (Baranski, 2012 ; Buès, 2000 ; Padilla et Furió-Mas, 2008).

1957 : L'atome C-12 est choisi, par les physiciens et les chimistes, comme une référence (Baranski, 2012 ; Buès, 2000 ; Dierks,

1981; Padilla et Furió-Mas, 2008) ; c'est l'isotope le plus abondant du carbone et qui donne le pic le plus élevé en spectrométrie de masse.

Connaissant la masse de cet isotope, il est facile de déterminer la masse de tout atome par spectrométrie (Baranski, 2012).

- L'évolution du concept de mole, de celui de masse à un moyen pour compter les entités à l'échelle sous-microscopique, est une des origines de conceptions ontologiques chez les enseignants et les élèves (Padilla et Furió-Mas, 2008).

- Le nombre d'Avogadro est immense (Buès, 2000 ; Kolb, 1978 ; Levy, 2015) et le cerveau de l'élève ne peut pas l'appréhender. Le plus ambigu est de lui dire qu'il pourrait prendre, dans sa main, un nombre d'Avogadro d'atomes (Kolb, 1978).

- Le nombre d'Avogadro est un pont entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique ; il est utilisé pour définir l'unité de masse atomique, ce qui laisse l'élève devant deux unités de masse en chimie ; le nombre d'Avogadro est lui-même défini par rapport à la masse d'un isotope de carbone mais il est appliqué à tous les éléments (Baranski, 2012). L'élève qui n'a pas développé le stade formel opératoire (Héron, 1975) et qui n'a pas compris les dimensions d'un nombre (Brousseau, 2010) n'arrivera pas à appréhender le nombre d'Avogadro.

	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'Avogadro ou constante d'Avogadro ? Quelle est la distinction entre les deux ? Si c'est une constante, pourquoi la valeur a-t-elle changé jusqu'à tout récemment ? Si c'est une constante, pourquoi l'unité est mol⁻¹ ? Que veut dire mol⁻¹? Le langage associé au nombre d'Avogadro est difficile à saisir.
<p>1961 : Ostwald avait introduit le terme « mole » pour désigner la grande masse, en opposition à « molécule » qui désigne la petite masse (Padilla et Furió-Mas, 2008). Le terme est conservé car en latin il désigne un tas, ce qui est essentiel pour compter des particules ; l'unité devrait être grande pour qu'elle soit observable (Kolb, 1978).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - L'évolution du concept de mole est accompagnée de l'évolution du concept de l'équivalence : en stœchiométrie, les rapports en masse sont devenus des rapports en mol. Cette évolution accentue la confusion entre la masse et la mole (Padilla et Furió-Mas, 2008). - Les élèves ont de la difficulté à organiser et à structurer les informations controversées relatives aux domaines macroscopique et sous-microscopique, et à les relier (Moss et Pabari, 2010). - Les élèves ont du mal à appréhender le mot mole, qui ne leur est pas familier (Gabel, Sherwood et Enochs, 1984).

1961 : Le concept « quantité de matière » est introduit sous le paradigme atomique, son symbole est « n » (Padilla et Furió-Mas, 2008).

- L'expression « quantité de matière » est controversée et source de confusion depuis qu'elle a été adoptée pour le SI, en 1971 par CGPM⁴ (De Bièvre, 2013/2014 ; Dierks, 1981; Padilla et Furió, 2008 ; Rocha Filho, 1990/2011). Cette expression désigne plutôt l'échelle macroscopique et évoque les propriétés physiques de la matière (la masse et le volume). Or la notion de particule n'émerge pas de la notion de matière (Baranski, 2012 ; Dierks, 1981 ; Gorin 1994; Padilla et Furió-Mas, 2008 ; Rocha-Filho, 1990/2011). Cette expression pourrait renforcer la conception de la continuité de la matière : les élèves croient que la structure de la matière à l'échelle sous-microscopique est identique à sa structure observable à l'échelle macroscopique (Potvin, 2011).

⁴ CGPM : General Conference on Weights and Measures

1961 : Trois méthodes pour déterminer une quantité de matière sont proposées : la masse, le volume et le nombre.

1971 : IUPAC, IUPAP, ISO et SI considèrent la mole comme l'unité de la quantité de matière. (définition 1)

1. *La mole est la quantité de matière d'un système qui contient autant d'entité qu'il y a des atomes dans 0,012 Kg de carbone 12 ; son symbole est « mole ». (À noter que le nombre d'atomes C-12 dans 0,012Kg de C-12 est la définition du nombre d'Avogadro)*

2. *Quand la mole est utilisée, l'entité élémentaire doit être spécifiée et peut être : atomes, molécules, ions, électrons, autres particules ou autre groupe de particules.*

3. *La mole est l'unité de base dans le système international des unités (BIPM, 2006, p. 115).*

- Le concept de mole est identifié par les élèves irlandais (Childs et Sheedan, 2009) comme étant le plus difficile. En passant tout d'abord de masse à quantité (Padilla et Furió-Mas, 2008), puis d'un concept à une unité du concept de quantité de matière, la mole est devenue plus problématique (Kolb, 1978 ; Padilla et Furió-Mas, 2008 ; Rocha Filho, 1990).

- La définition, telle que divulguée, porte à confusion puisque le gramme est aussi une quantité de matière.

- Les différentes définitions sont à l'origine de confusions, pour les enseignants et les élèves, entre la masse, le volume et la quantité de matière (Kolb, 1978).

- L'ajout du mot « système » à la définition est essentiel pour désigner un ensemble de particules. Mais le mot particule reste problématique puisqu'il n'est pas propre à l'ion, à l'électron, etc. (Dierks, 1981).

- Le calcul d'une quantité de matière à partir du nombre d'entités est critiqué, puisque les particules ne peuvent pas être considérées comme étant des propriétés physiques, comme le sont la masse et le volume (Dierks, 1981). Cette proposition est une source de confusion entre nombre et propriétés physiques (masse et volume).

	<p>- La définition proposée exige un développement cognitif avancé chez l'élève puisqu'il doit établir une relation avec le nombre immense d'Avogadro et qu'il doit comparer la masse d'une quantité de matière avec celle d'un isotope de carbone (Staver et Lumpe, 1993). En effet, le nombre d'Avogadro étant défini par rapport à l'isotope C-12 ; les élèves pourraient croire qu'il est seulement utilisé pour le carbone.</p>
--	--

Autres définitions utilisées :

Définition 2

A. Quantité de matière contenant un nombre de molécules égal au nombre d'atomes contenus dans 12 g de l'isotope de carbone ^{12}C ; cette quantité s'exprime en grammes par un nombre égal à la masse moléculaire (d'apr. *Encyclopédie des sciences et des techniques*. t.2 1970, p. 197 et t.9 1973, p. 16).

Synonyme modifié de *molécule-gramme*. *On a vu que la théorie cinétique des gaz avait permis à Loschmidt de déterminer une valeur approximative du nombre de molécules contenues dans une molécule-gramme (ou mole), ou nombre d'Avogadro N (Histoire générale des sciences., t.3, vol. 2, 1964, p. 229).*

B. Unité de quantité de matière dans le Système international d'unités. *La mole [symbole mol] est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires [atomes, molécules, ions, électrons, etc.] qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 (Encyclopédie des sciences et des techniques.t.7, 1972, p. 741).*

- Dans certaines définitions (voir définition 2-A) la mole est confondue avec la masse puisqu'elle est exprimée en g.

<p>(http://www.cnrtl.fr/definition/mole consulté le 10 mars 2019 2019)</p>	
<p>Définition 3 : Le nombre de n'importe quel objet égal au nombre d'Avogadro est une mole (Baranski, 2012).</p> <p>Définition 4 : Une définition vulgarisée : la mole est un ensemble de $6,023 \times 10^{23}$ particules (Vogel, 1992)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La définition vulgarisée (voir définition 3 et définition 4) renforce la confusion entre la masse molaire et la masse atomique ; elle semble transposer la chimie du domaine des sciences au domaine de la magie (Vogel, 1992).
<p>Définition 5 : En 2013, une nouvelle définition officielle est divulguée dans par BIPM (2013 ; voir ci-dessous)</p> <p>Définition 6 : En novembre 2018, une nouvelle révision des définitions a été effectuée. Leur adoption officielle a eu lieu en mai 2019 (voir ci-dessous).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La définition devient plus précise, toutefois une indication d'une particularité de la quantité de matière serait souhaitable : la mole ne peut pas être mesurée à l'aide d'un instrument de mesure, elle doit être calculée. - Le problème posé par l'expression « quantité de matière » n'est pas résolu.

Tableau 1 : L'évolution socio-historique du concept de mole, source d'obstacles épistémologiques et didactiques.

Définition 5 :

La grandeur utilisée par les chimistes pour spécifier la quantité d'éléments ou de composés chimiques est maintenant appelée « quantité de matière ». La quantité de matière est définie comme étant proportionnelle au nombre d'entités élémentaires d'un échantillon, la constante de proportionnalité étant une constante universelle identique pour tous les échantillons. L'unité de quantité de matière est appelée la mole, symbole mol, et la mole est définie en fixant la masse de carbone 12 qui constitue une mole d'atomes de carbone 12. Par un accord international, cette masse a été fixée à 0,012 kg, c'est-à-dire 12g.

[...]

Dans le nom « quantité de matière », les mots « de matière » pourraient être simplement remplacés par d'autres mots précisant la matière en question pour chaque application particulière, ainsi par exemple on pourrait parler de « quantité de chlorure d'hydrogène, HCl » ou de « quantité de benzène, C₆H₆ ». Il est important de toujours préciser l'entité en question (comme le souligne la seconde phrase de la définition de la mole), de préférence en donnant la formule chimique empirique du matériau concerné. Bien que le mot « quantité » ait une définition plus générale dans le dictionnaire, cette abréviation du nom complet « quantité de matière » est parfois utilisée par souci de concision.

(BIPM, 2013, section 2.1.1.6)

Définition 6

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 mol^{-1} [$\frac{1}{\text{mol}}$].

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. (CGPM, 2018, p. 4)

La communauté scientifique cherche toujours un nom adéquat au concept pour remplacer « quantité de matière » et elle se questionne sur le choix entre les termes : nombre d'Avogadro ou constante d'Avogadro. Guinta (2015) reprend les résultats d'une analyse de 1541 articles publiés depuis l'an 2000 ; il note une préférence pour le terme nombre d'Avogadro. Mais d'ici à ce que la communauté scientifique se décide sur les expressions et termes de remplacement, les praticiens imposent leur langage en utilisant « nombre de moles » et « nombre d'Avogadro », sans se préoccuper du sens réel de la définition du concept de mole.

En conclusion, une anomalie épistémologique existe depuis le début de l'histoire du concept de mole (Azcona et al., 2002). Cette anomalie entraîne des représentations erronées du concept chez les enseignants et chez les élèves. Or Astolfi (1989) confirme la proposition de Bachelard (1938/2004) selon laquelle l'enseignement ne vise pas un transfert de culture mais un changement de culture et ceci en faisant évoluer les représentations erronées des apprenants. Dans le cas de la mole, il semble qu'une formation soit indispensable pour provoquer un changement conceptuel chez les enseignants, dont l'enseignement est la source des conceptions des élèves (qui, dans un tel cas, sont appelées des obstacles didactiques).

2.2.4 Le changement conceptuel

Un enseignement efficace des sciences ne peut se réaliser qu'en provoquant une rupture épistémologique chez l'élève (Thouin, 2017a). Cette rupture, souvent nommée « changement conceptuel », dont certains principes fondamentaux avaient déjà été énoncés par Bachelard, Piaget et Kuhn dès le milieu du XXe siècle, a fait l'objet d'un grand nombre de travaux depuis le début des années 1980.

Comme Patrice Potvin l'a clairement montré dans son ouvrage *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école* (2019), on peut classer les modèles de changement conceptuel en trois grandes catégories dont l'ordre correspond à leur évolution historique : 1) les modèles de remplacement des conceptions, 2) les modèles de transformation des conceptions et 3) les modèles de coexistence des conceptions.

Les modèles de remplacement des conceptions sont basés sur le postulat qu'un enseignement efficace des sciences permet de remplacer les conceptions non scientifiques des élèves par les concepts de la communauté scientifique. Le plus connu de ces modèles est celui de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) selon lequel le changement conceptuel peut se produire si l'élève vit des conflits cognitifs (exemple : une démonstration dont les résultats sont surprenants) qui lui permettent de ressentir une insatisfaction envers ses conceptions initiales, et si, par la suite, l'élève trouve que les concepts scientifiques par lesquels l'enseignant souhaite que l'élève remplace ses conceptions sont intelligibles, plausibles et fertiles. Bien que, de nos jours, les modèles de remplacement soient encore les plus populaires, de recherches plus récentes ont montré que les conflits cognitifs sont rarement aussi efficaces que ces modèles le prévoyaient.

Les modèles de transformation des conceptions reposent sur l'idée que le changement conceptuel est plutôt une restructuration des structures cognitives des élèves. Dans ce contexte, on considère que les conflits cognitifs peuvent s'avérer utiles, mais que leur visée est plus modeste et consiste principalement à modifier les catégories dans lesquelles les élèves placent divers objets et phénomènes. Le modèle des *p-prims* (« primitives phénoménologiques ») de diDessa (1993), qui décrit certaines interprétations élémentaires fréquentes, telle que « plus près = plus fort », et le modèle des catégories ontologiques de Vosniadou et Brewer (1992), qui décrit des caractéristiques implicites d'objets ou d'environnements, tel le fait que la chute d'un objet se produit toujours vers le bas, sont deux exemples représentatifs des modèles de transformation des conceptions. Toutefois, certaines recherches contemporaines font ressortir le fait que les modèles de transformation des conceptions expliquent mal la persistance de certaines conceptions chez les élèves.

Les modèles de coexistence des conceptions, qui s'appuient en partie sur des résultats de recherche en neurosciences, proposent l'idée que les conceptions initiales persistent, après le changement conceptuel, et que le cerveau doit les inhiber pour que les élèves soient en mesure

de faire appel aux concepts scientifiques appris durant les cours de sciences. Le principe de l'utilité cognitive perçue (Ohlsson, 2009), selon lequel des idées peuvent être reconnues comme plus puissantes par les élèves, pourrait expliquer comment des concepts scientifiques réussissent à inhiber certaines conceptions. Un exemple très représentatif de modèle de coexistence des conceptions est le modèle de la prévalence conceptuelle (Potvin, Sauriol et Riopel, 2015). Selon ce modèle, il est préférable de commencer l'enseignement par la présentation des concepts scientifiques à faire apprendre, de développer ensuite chez les élèves le réflexe d'inhiber leurs conceptions non scientifiques, puis d'automatiser, dans divers contextes, l'emploi des concepts scientifiques.

Dans le cadre de cette recherche, la formation donnée aux enseignants visait d'abord à leur permettre de bien distinguer des concepts scientifiques (qu'ils maîtrisent relativement bien) de conceptions fréquentes qu'ils n'auraient peut-être pas toujours la vigilance d'inhiber. Mais cette formation visait surtout à faire en sorte que les enseignants évitent les définitions, les explications, les analogies, les illustrations et les modèles qui peuvent être la source d'obstacles didactiques, c'est-à-dire de conceptions fausses, chez leurs élèves. Les modèles de coexistence des conceptions, notamment celui d'Ohlsson (2009) et celui de Potvin, Sauriol et Riopel (2015) furent retenus.

Planifier des situations où l'élève vit une rupture épistémologique et inhibe ses conceptions initiales afin de développer un bagage de connaissances scientifiques pertinentes n'est pas évident. Un enseignement des sciences basé sur de telles situations doit relever plusieurs défis.

2.3 L'enseignement des sciences, de la chimie et du concept de mole

Parmi les divers concepts qui touchent l'enseignement et qui sont abordés dans la problématique (programmes d'études, manuels scolaires, formation initiale des enseignants, formation continue), certains sont plus importants que d'autres, d'un point de vue théorique, et présentent un lien plus direct avec la question principale de recherche. Il s'agit des concepts de

constructivisme, de socioconstructivisme, de transposition didactique et de développement professionnel des enseignants. Ils constituent les objets de la présente section.

2.3.1 Réussir un programme centré sur l'apprentissage.

L'enseignement est une interaction entre des connaissances d'un enseignant et celles d'un ou de plusieurs élèves et qui vise à mettre en forme les connaissances des élèves (Conne, 1992). Les dispositifs d'enseignement permettent, dans leur diversité et leur capacité d'intervention à différents niveaux, le fonctionnement didactique de la classe (Chevallard et Joshua, 1991). Étant donné qu'on peut considérer que la didactique s'inspire en partie du constructivisme (Astolfi et al., 2008), elle tend à privilégier l'enseignement dynamique, centré sur la conception de situations, à l'enseignement purement transmissif.

Réussir son enseignement, dans des programmes centrés sur l'apprentissage, consiste à relever plusieurs défis, par exemple : 1) identifier les processus de compréhension (copier de la réalité, expliciter ou développer et tester) (Jansoon et al., 2009, p. 148) ainsi que les modèles de raisonnement quand l'élève répond à des questions (Cormier, 2014) ; 2) faire émerger les conceptions et tenir compte des obstacles d'apprentissage (Astolfi, 2014) et 3) gérer les différences dans sa classe en les considérant toutes : celles dues à l'effet-école, à l'enseignant (discours, culture, génération...) et aux élèves (intelligence, mode de pensée, biais préférentiels...) (Bisaillon, 2005 ; Kahn, 2010). D'un point de vue didactique, l'enseignement vise surtout à développer le « domaine cognitif », (plutôt que les domaines affectifs ou moteurs) chez l'élève car « faute d'une base cognitive solide, les concepts disciplinaires ne peuvent évidemment se déployer, mais réciproquement la maîtrise de ceux-ci va rétroagir sur l'enrichissement des formes possibles du raisonnement » (Astolfi, 2014, p. 28). Le cognitif, selon Astolfi (2014), « s'appuie sur les opérations mentales et le raisonnement, c'est-à-dire sur la logique », mais le cognitif doit être appuyé par les concepts disciplinaires qui favorisent la compréhension du monde. Ces concepts doivent être le plus complets, cohérents et pertinents que possible pour favoriser des réponses correctes de l'élève (Cormier, 2014).

L'enseignement est basé sur « un texte de savoir » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 58) dont le contenu provient à la fois de la communauté scientifique, de la communauté éducationnelle et de l'enseignant lui-même, que des réorganisations ou des révisions successives

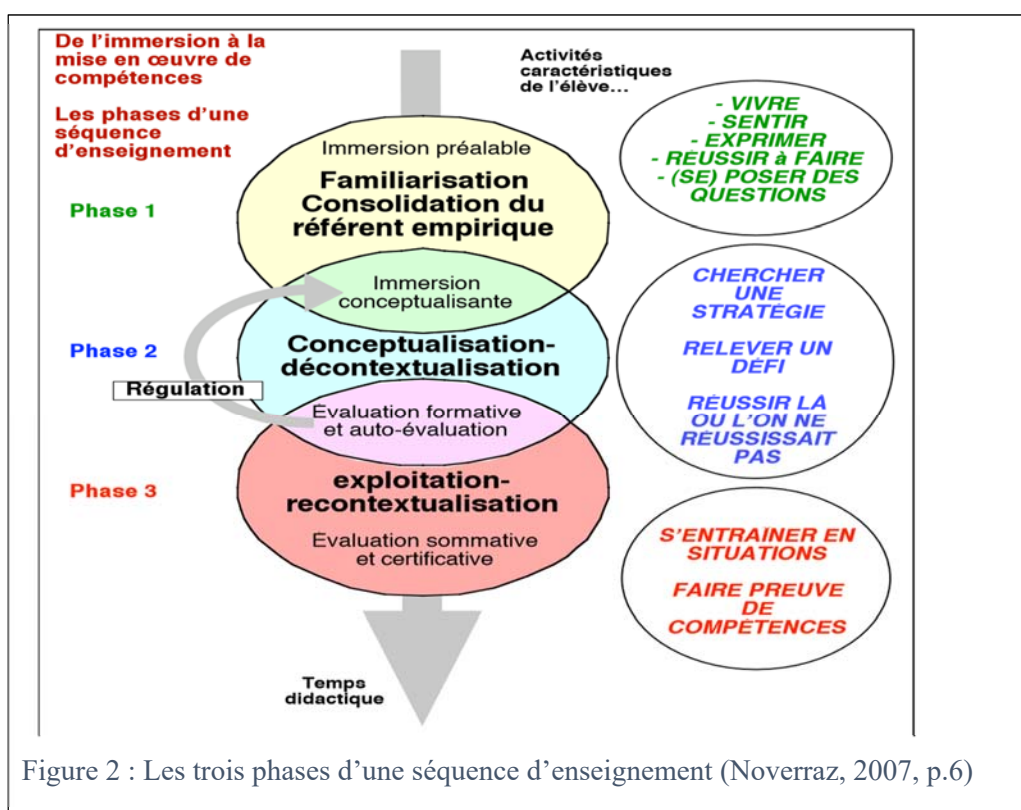
peuvent rendre de plus en plus apte à susciter des apprentissages. Ce « texte du savoir » devrait idéalement préciser les concepts, les lois et leurs applications que les élèves doivent s'approprier, les conceptions alternatives et les obstacles épistémologiques fréquents chez les élèves, la remédiation anticipée, les autres types d'erreurs prévisibles et les obstacles didactiques à éviter. L'enseignant peut s'appuyer sur ce « texte de savoir » pour rendre son enseignement plus efficace. Ce texte détermine la cohérence entre la transposition didactique externe et la transposition didactique interne puisque certains savoirs savants s'estompent au fil de la transposition tandis que d'autres prennent plus d'importance (Chevallard et Joshua, 1991).

En enseignement des mathématiques, on peut distinguer les notions para-mathématiques et proto-mathématiques. Les notions para-mathématiques existent « dans le champ de perception didactique » de l'enseignant ; ils consistent en « des objets de savoirs « auxiliaires » nécessaires à l'enseignement », qui sont appris par l'élève de façon inductive et implicite sans bénéficier de séances d'enseignement et d'apprentissage. Les notions proto-mathématiques constituent les notions enseignées explicitement et qui mobilisent le contrat didactique (Chevallard et Joshua, 1991, p. 51). Ces deux types de notions se retrouvent aussi en enseignement des sciences où des savoirs comme « paramètre », « démonstration », « équation », « calcul », etc. sont parascientifiques, tandis que les concepts à enseigner comme « la mole », « l'équivalence acido-basique », « l'analyse quantitative » etc. sont proto-scientifiques. On notera au passage que les notions para-mathématiques et proto-mathématiques constituent des notions parascientifiques puisque le calcul et le langage mathématique sont omniprésents en sciences. Tel que mentionné précédemment, ces notions parascientifiques de nature mathématique sont à l'origine de nombreuses difficultés chez les élèves, même quand certaines notions proto-scientifiques sont acquises.

Noverraz (2007) propose un modèle de séquence d'enseignement inspiré des orientations constructivistes (figure 2). Il comporte trois phases : 1) La familiarisation et la consolidation du référent empirique : Cette phase permet ce que plusieurs didacticiens appellent la dévolution⁵ ; 2) La conceptualisation-décontextualisation : Cette phase consiste principalement, pour l'élève, à relever un défi ; et 3) L'exploitation-recontextualisation : Cette

⁵ Processus didactique qui conduit un élève à s'approprier un problème. Plus généralement, selon Guy Brousseau « [...]la dévolution consiste pour l'enseignant, non seulement à proposer à l'élève une situation qui doit susciter chez lui une activité non convenue, mais aussi à faire en sorte qu'il se sente responsable de l'obtention du résultat proposé, et qu'il accepte l'idée que la solution ne dépend que de l'exercice des connaissances qu'il possède déjà » (Noverraz, 2007, p.7).

phase est aussi appelé l'institutionnalisation. Dans cette séquence, Noverraz met l'accent sur le statut constructiviste de l'erreur, qui peut jouer le rôle d'adjuvant favorisant une construction efficace du savoir. Il insiste également sur le « souci épistémologique » qui favorise la pertinence du savoir enseigné et qui se concrétise par la création d'un « milieu didactique » qui permet à l'élève de vivre des démarches de recherche et, ainsi, de construire son savoir. Dans ce « milieu didactique » le temps d'enseignement et le temps d'apprentissage se distinguent et la diachronie du système didactique est planifié en distinguant une chronogenèse et une topogenèse (Chevallard et Joshua, 1991, p. 72-73).



Le constructivisme et le socioconstructivisme

« Le terme clé pour promouvoir la saveur des savoirs est celui du “ constructivisme ”, sous ses trois facettes : premièrement, les savoirs eux-mêmes résultent d'une construction sociale et historique que leur naturalisation tend à gommer ; deuxièmement, l'acquisition des savoirs passe par un processus de construction active par les sujets qui tend à échapper aux experts ; troisièmement, l'enseignement des savoirs suppose la construction de dispositifs calculés bien éloignés de la simple transmission » (Astolfi, 2014, p. 117).

Fondé par Piaget, le constructivisme repose sur la notion de schèmes, qui sont les structures cognitives qui se construisent, se multiplient et se coordonnent tout au long du développement cognitif de l'élève. Les stratégies d'enseignement constructivistes incitent l'élève à construire des connaissances par appropriation d'un savoir de façon progressive et dynamique puisque chaque nouvelle connaissance génère un moment de déséquilibre se muant en une « rééquilibration majorante ». Comme le dit Astolfi et al. (2008), qui cite Bachelard : « Rien ne va de soi, rien n'est donné, tout est construit ».

Astolfi (2014) distingue trois types de constructivisme : le constructivisme épistémologique, le constructivisme psychologique et le constructivisme pédagogique. Le constructivisme épistémologique considère que le savoir est construit en réponse à des questions théoriques et qu'il possède une identité sociale et culturelle. Le constructivisme psychologique ne voit pas l'élève comme une « tabula rasa », mais plutôt comme un individu autonome et actif qui construit son savoir dans le cadre de situations contextualisées. Le constructivisme pédagogique est fondé sur le principe que l'enseignement doit s'écarter de la transmission et mettre en œuvre des dispositifs didactiques visant des obstacles d'apprentissage. Dans cette optique, les compétences professionnelles des enseignants pour construire des situations sont essentielles.

Deux conséquences de ces trois constructivismes en didactique sont l'importance d'une perspective historique et des conceptions alternatives des élèves. En effet, une perspective historique permet non seulement d'enrichir la culture scientifique des élèves, mais elle permet de contextualiser le savoir, d'autant plus que les conceptions des élèves sont souvent les mêmes que les concepts scientifiques d'époques antérieures (Thouin, 2017 a). Par ailleurs, tel que déjà mentionné, une prise en compte des conceptions alternatives de l'élève, que de nombreuses recherches en didactique ont permis de bien identifier, s'avère cohérente avec le fait que l'élève n'est pas une « tabula rasa » et que l'enseignement doit viser une évolution progressive de ses conceptions. L'école aurait avantage à ne plus imposer « un système de contrainte non compris » entraînant l'enfant dans des conduites mimétiques, mais à « faire des modalités de la conceptualisation des élèves le moteur principal de la progression » : dans ce cas l'enseignant joue le rôle de médiateur, il écoute et oriente (Astolfi et Develay, 1989) l'élève pour lui faire construire son savoir.

Le socioconstructivisme est un constructivisme planifié à travers une interaction sociale qui favorise deux déstabilisations cognitives : une déstabilisation intra-individuelle causée par des conflits de centration, comme dans le constructivisme, et une déstabilisation interindividuelle causée par des conflits sociocognitifs. Chaque nouvelle structure cognitive reste sensible à d'autres interactions sociales et le développement cognitif ne se fait pas de façon linéaire, mais plutôt en spirale, en repassant par plusieurs déstabilisations (Astolfi et al., 2008).

Les conflits sociocognitifs doivent, idéalement, présenter quatre caractéristiques : un respect de la zone proximale de développement de l'élève (ZDP)⁶ ; un engagement et une implication des élèves dans le conflit prévu en évitant tout sentiment d'infériorité d'un élève par rapport à d'autres ; une interaction qui permet une confrontation des conceptions alternatives ; une coordination des actions qui favorise le partage de sens et la coopération.

L'enseignant, dans le cadre d'une perspective constructiviste (ou socioconstructiviste), est un expert qui pourra faire des inférences plausibles et anticiper des impasses d'apprentissage (Glaserfeld, 1994). Cette compétence est acquise par des pratiques professionnelles en classe et par un engagement « dans une démarche individuelle ou collective de développement professionnel » (Gouvernement de Québec, ministère de l'Éducation, 2001) où l'interaction sociale et professionnelle favorise l'ouverture aux recherches pédagogiques et didactiques.

Selon Hattie (2009), de nos jours, le constructivisme est l'approche privilégiée par les enseignants dont les élèves réussissent. Cette approche, où l'élève est au centre de son apprentissage, se caractérise par des situations dites « authentiques », « qui permettent la découverte » et « qui visent une motivation intrinsèque dans l'apprentissage ». En pratique, plusieurs approches pourraient être mises en pratique : la résolution de problèmes scientifiques et technologiques, la modélisation, l'enquête, etc. En sciences, ces approches pourraient favoriser le développement d'habiletés et d'attitudes scientifiques ainsi que de compétences disciplinaires chez l'élève.

⁶ La ZDP a été définie par Vygotsky dans « Langage et pensées » paru en 1934 à Moscou. Il s'agit d'une zone située entre celle où l'élève est capable d'accomplir certaines tâches seul et celle où il a besoin de l'appui de l'autre. La ZDP serait la distance entre ces deux situations (Lecomte, 1998).

La modélisation

Dans le langage courant, le mot modèle évoque surtout la notion de modèle réduit ou de maquette. En sciences, il désigne un concept plus complexe, aux applications plus vastes. En effet, un modèle peut être défini comme un dispositif de recherche qui facilite l'étude d'un système (Legay, 1997).

« Penser avec des modèles » ou « apprendre la modélisation » c'est acquérir la compétence de résoudre des problèmes en faisant concorder des « théories » et des « faits » (Ney, 2006). 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). Il évolue avec l'évolution des lois et des théories auxquelles il est associé. Un modèle est « hypothétique, modifiable et pertinent pour certains problèmes, dans certains contextes » (Martinand, 1996, p. 1/ 2010, p. 20).

Un modèle peut posséder deux fonctions. Soit il possède une fonction pratique et technique et permet une « réduction opératoire » puisqu'il aide à illustrer un fonctionnement ou des relations. Soit il possède une fonction théorique (Crête et Imbeau, 1996) et les lois associées à une théorie sont représentées par le modèle et reliées entre elles.

Les modèles peuvent être classés en trois catégories : les modèles à l'échelle (exemple : illustrer l'objet à une échelle plus petite ou plus grande, comme les modèles moléculaires), les modèles analogiques (exemple : construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier, comme le modèle atomique) et les modèles théoriques (exemple : construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène, par exemple des relations entre des variables) (Crête et Imbeau, 1996). Dans ce dernier cas, la modélisation vise une « représentation calculable » (Martinand, 1996). À noter que pour le concept de mole, on se sert surtout du modèle à l'échelle et du modèle théorique.

De nombreux chercheurs, dont Crête et Imbeau (1996), Martinand (1996) et Thouin (2017a), préconisent d'enseigner à la fois la modélisation et les modèles plutôt que simplement les modèles. Cette façon d'enseigner tient compte de trois aspects : 1) l'épistémologie du savoir (les éléments du modèle abordables), 2) la psychologie (processus cognitif et rapport des élèves au savoir) et 3) la pédagogie et de la didactique (incluant le contrat didactique) (INRP et LIREST, 1992). Au cours de la construction d'un modèle, l'élève fait preuve d'analyse et de synthèse. L'enseignement de la modélisation pourrait ainsi suivre les étapes suivantes :

l'utilisation d'un modèle existant, la modification d'un modèle existant et la construction d'un nouveau modèle (Crête et Imbeau, 1996 ; Martinand, 1996/2010).

Le tableau 2 présente des questions que peut se poser l'élève, devant un problème, pour en modéliser la solution. En effet, une activité d'apprentissage visant une modélisation comporte un problème qui exige une interprétation et une prise de décision. L'élève peut, par exemple, citer des faits, consulter des sources d'information, s'appuyer sur des cas similaires, etc. Ce cheminement peut être l'application d'un raisonnement par induction et d'un raisonnement par déduction. L'induction permet la construction d'un modèle explicatif : observer les faits, les expliquer, construire le modèle. La déduction permet l'exploitation de modèles déjà existants pour résoudre le problème (Crête et Imbeau, 1996).

Étapes	Questions
Analyse	À quel ensemble mon objet est-il rattaché ? Quelles sont les autres parties de cet ensemble ? Quelles sont les parties constitutives de mon objet ? Quelles sont les fonctions de mon objet ?
Synthèse	Quelles sont les variables ? Qu'est-ce qui cause quoi ? Par quels mécanismes les causes sont-elles liées aux effets ? Quelles sont les relations entre les variables ? Quel est le diagramme de causalité ?
Résultat	Formuler explicitement les postulats sur lesquels sont fondées les propositions théoriques.

Tableau 2 : Méthode de modélisation analyse-synthèse (Crête et Imbeau, 1996)

Martinand (1996/2010), pour sa part, propose trois registres de la modélisation : le référent empirique, l'élaboration représentative et la matrice cognitive (voir la figure 3). Les liens entre ces trois registres permettent une « modélisation de la modélisation ». La modélisation se base sur un référent empirique qui comporte une représentation concrète (phénoménotechnique) et semi-concrète (phénoménographie) d'un phénomène ou d'un problème. Ce référent empirique permet la construction de concepts ou d'un modèle, dont l'application donne lieu, en retour, à un discours au sujet du phénomène ou du problème (phénoménologie). De plus, l'abstraction et la théorisation du modèle permettent la construction d'une matrice cognitive qui comporte des notions théoriques et des paradigmes épistémiques.

En pratique, cependant, l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation ne se fait pas sans certaines incohérences. D'une part, l'enseignement de la modélisation exige des habiletés professionnelles et disciplinaires que les enseignants n'ont pas toujours acquises, ce qui peut les conduire à un enseignement dogmatique des modèles, sans construction par l'élève. D'autre part, l'apprentissage de la modélisation n'est pas toujours réaliste dans un contexte où de nombreux concepts de physique et de chimie demeurent mal compris ou très abstraits pour les élèves. Ces incohérences sont d'ailleurs une des causes du décrochage des élèves en sciences (Martinand, 2010).

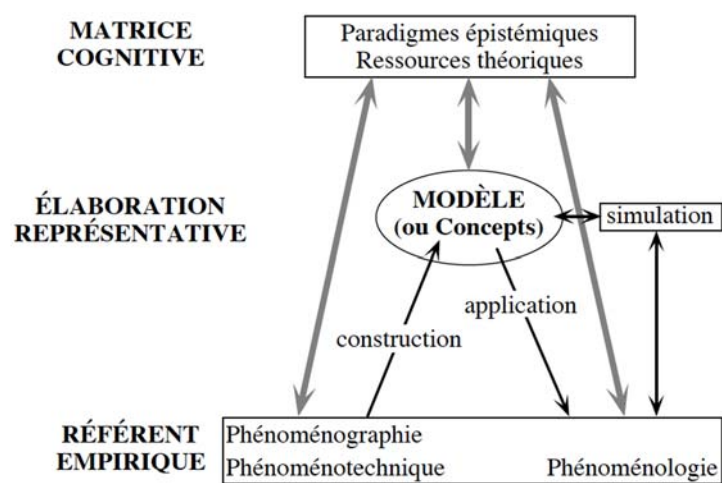


Figure 3 : Les trois registres de la modélisation (Martinand, 1996, 2010)

Fang et al. (2016) ont noté que les élèves appliquent les formules d'une façon automatique et ont parfois recours à des algorithmes où le savoir mathématique et scientifique perd son sens. Une activité durant laquelle l'élève construit un modèle à l'échelle de la constitution de la matière favorise une appropriation du concept qui vise à « compter en pesant ». Autrement dit, à identifier l'aspect qualitatif et quantitatif de ce concept (Fang et al., 2016).

Puisque plusieurs élèves considèrent la réalité et les modèles comme appartenant à deux univers séparés, l'enseignement de la modélisation ne peut réussir que s'il y a création d'un lien constant entre le modèle et le réel. Pour ce faire, diverses stratégies et techniques peuvent être exploitées en classe : les analogies, les jeux de rôle, l'expérience directe, les

simulations, etc. (Williams, 1983). L'enseignement par analogie s'avère particulièrement intéressant pour l'enseignement du concept de mole.

L'enseignement par analogie

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 pédagogique 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). Pour aider l'élève à raisonner par analogie, l'enseignant se réfère à un savoir antérieur acquis par l'élève (Hashweh, 1996). Ce savoir antérieur joue le rôle de domaine de référence qui permet de construire un nouveau savoir nommé domaine-cible (Cauzinille-Marmèche, Mathieu et Weil-Barais, 1985 ; Glynn, 2007 ; Heywood et Parker, 2009 ; Sarantapoulos et Tsaparlis, 2004).

Pour réussir l'enseignement par analogie, il importe de trouver le domaine de référence qui offre le plus de ressemblance avec le domaine-cible (systèmes, grandeurs, propriétés...) (Dupin et Joshua, 1994 ; Sarantapoulos et Tsaparlis, 2004 ; Williams, 1991). Selon le degré de ressemblance, deux isomorphismes peuvent être établis : l'isomorphisme complet et l'isomorphisme partiel (Dupin et Joshua, 1994). 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 analogique ; 3) la pertinence de la situation, qui permet d'éviter une confusion entre les deux domaines (Dupin et Joshua, 1994).

Dans le cas de l'enseignement du concept de mole, l'analogie facilite l'appréhension du monde sous-microscopique par l'élève. L'« analogie modélisante » (Dupin et Joshua, 1989) est privilégiée, puisqu'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. L'élève devrait être capable de construire les modèles théoriques (les formules) pour « compter en pesant ». 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).

La réussite d'une analogie dépend de la réussite du transfert du domaine de référence au domaine cible. Ce transfert dépend de plusieurs facteurs : plus le domaine de référence résonne avec l'expérience personnelle de l'élève et plus le transfert est fluide ; plus le développement cognitif de l'élève est avancé et plus le transfert est pertinent ; plus la sélection des éléments pertinents de l'analogie et la précision des limites de l'analogie sont ciblés et plus le transfert est plus efficace (Heywood et Parker, 2009). Cela dit, les élèves pourraient percevoir une analogie de façon différente à cause du large éventail de leurs expériences et des représentations construites au cours de ces expériences (Heywood et Parker, 2009). Dans ce cas, la construction d'une activité créant un pont entre le domaine de référence et le domaine cible pourrait favoriser un changement conceptuel (Heywood et Parker, 2009). Une fois le transfert réussi, une exploitation expérimentale des notions dans le domaine-cible devient plus accessible aux élèves (Dupin et Joshua, 1994).

L'enseignement par analogie est fécond si l'analogie est intelligible, si l'élève est bien familiarisé avec le domaine de référence, s'il est capable de transférer les connaissances au domaine cible et si les analogies sont utilisées pendant une assez longue période (Friede, Gabel et Samuel, 1990). Cet enseignement est centré sur l'apprentissage puisque l'élève vit un conflit intra-personnel et interpersonnel pour s'approprier l'analogie, transférer les connaissances au domaine cible et compléter son apprentissage dans le domaine cible.

La connaissance des approches constructivistes de l'enseignement de la chimie, comme la modélisation et l'utilisation des analogies, est essentielle pour gérer des programmes centrés sur les apprentissages. Comme le montre le triangle didactique, la construction des démarches didactiques, par et chez l'élève, dépend du contrat didactique et de la transposition didactique du savoir.

2.3.2 La transposition didactique

Selon le Larousse (2016, p. 1166), le mot transposition désigne « une action de placer des éléments dans un ordre différent de celui où ils figuraient ». En musique, ce mot désigne « le transfert des notes d'un morceau d'une hauteur à une autre sans changer ni les intervalles entre les notes ni la valeur des notes ». Mercier (2002, p. 135) rappelle ces origines du mot « transposition » et l'introduction de la notion de la transposition par Verret, en 1975, en sociologie, pour identifier les savoirs enseignables à partir des savoirs savants. Il a fallu attendre Chevallard (1985/1991) pour que la notion de transposition soit adoptée en didactique des mathématiques. Il en proposa la définition suivante : « Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre sa place parmi les objets d'enseignement. Le « travail » qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la transposition didactique » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 39). De nos jours, la notion de transposition didactique, qui comporte les étapes décrites ci-après, se retrouve dans toutes les didactiques, c'est-à-dire « les disciplines de recherche qui analysent les contenus (savoirs, savoir-faire...) en tant qu'ils sont objets d'enseignement et d'apprentissage, référés/ référables à des matières scolaires » (Reuter et al., 2013).

La transposition didactique, qui n'est ni bonne ni mauvaise en elle-même, est un processus inévitable pour créer des objets didactiques (de savoir et d'enseignement tout à la fois) « rendus “ nécessaires ” par les contraintes du fonctionnement didactique » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 41). Au cours de ce processus, une « élémentarisation » s'opère afin de donner une forme scolaire à un savoir savant (Astolfi, 2014, p. 47). En d'autres termes, le système scolaire crée un savoir enseignable, mais ce savoir diffère du savoir savant (Chervel, 1998).

Les étapes de la transposition didactique

L'élaboration des savoirs scolaires résulte des manipulations des savoirs savants et des savoirs relatifs à des pratiques sociales de références tout au long d'un processus qui témoigne des interférences entre les savoirs savants et des facteurs sociaux comme la culture et les valeurs de la société (Astolfi, 2014). Durant ce processus, une réélémentarisation, ou une réorganisation du savoir, vise à l'adapter au niveau de développement cognitif, au bagage conceptuel et aux

préoccupations de l'élève (Chevallard, 1997). C'est ainsi que le savoir savant, créé dans la communauté scientifique, suit un long parcours avant d'être acquis par l'apprenant. Les transformations réalisées au cours de ce parcours dépendent de facteurs qui relèvent de l'environnement social et culturel ainsi que de facteurs personnels relatifs à l'enseignant et aux élèves.

Au cours du processus de la transposition didactique, le savoir savant risque de subir des « transformations adaptatives » en fonction de l'environnement social et scolaire. Chevallard (1985/1991) en dénombre sept : la dogmatisation, la décontextualisation, la dépersonnalisation, la désyncrétisation, la programmation, la reformulation et l'opérationnalisation. Une « surveillance épistémologique » est donc essentielle pour réduire l'écart entre le savoir savant et le savoir enseigné (Astolfi et al., 2008, p. 149). De nombreux chercheurs comme Boilevin (2013) et Perrenoud (1998) ont explicité les inconvénients d'une transposition qui risque de rendre le savoir irréfutable (i.e. dogmatique), inutile et désorganisé.

Le processus est illustré par la figure 4 (Clerc, Minder et Roduit, 2006), où le savoir savant s'articule avec des pratiques sociales de référence : « les *pratiques* renvoient aux activités “ réelles ” d'un espace *social* identifié, qui peut servir de *référence* pour la conception ou l'analyse d'activités scolaires » (Reuter et al., 2013, p. 175).

Durant une première phase, les savoirs savants et les pratiques sociales de référence, sont triés par la noosphère (les représentants du système d'enseignement et les représentants de la société tels que les parents, les politiciens et les chercheurs) (Chevallard et Joshua, 1991, p. 25) en « des savoirs enseignables et des savoirs non enseignables » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 57). Des savoirs à enseigner, conformes aux valeurs et aux besoins de la société, sont transmis aux concepteurs des programmes qui les « élémentarisent » (Astolfi, 2014, p. 47) selon des progressions qui respectent une logique scolaire. L'étape suivante est la conception de manuels, dans lesquels les programmes sont concrétisés en texte de savoirs (Chevallard et Joshua, 1991) et en activités, tout en éliminant « si souvent le contexte des découvertes comme la personnalité des chercheurs. Ce que ceux-ci ont établi tend à leur échapper, pour devenir un savoir sans auteur, sans acteur, qui ne tient que par les vertus d'une démonstration interne » (Astolfi, 2014, p. 26). Ces étapes constituent la transposition didactique externe. Par la suite, une transposition interne a lieu en classe. Sa réussite dépend des méthodes d'enseignement et des processus cognitifs de l'apprentissage. À ce stade, le savoir « à enseigner » est (totalement

ou partiellement) enseigné, puis il est (totalement ou partiellement) reconstruit par l'élève avant d'être évalué (Thouin, 2017 a).

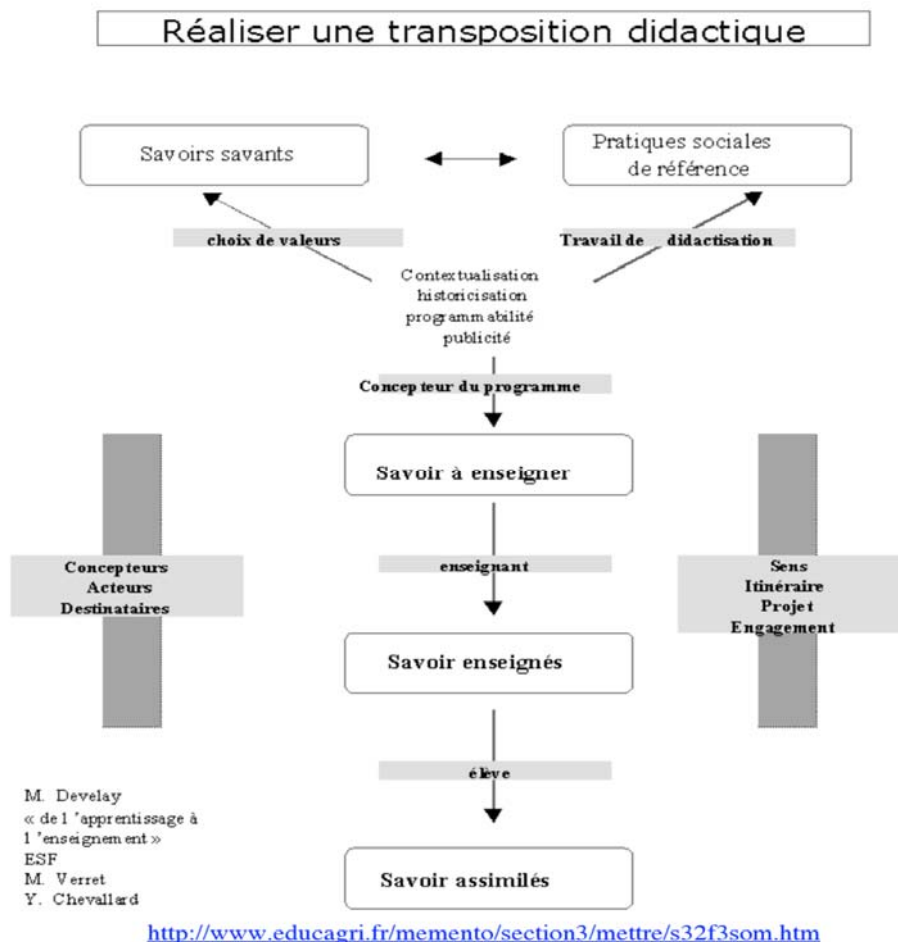


Figure 4 : Le processus de la transposition didactique

La légitimité du savoir enseigné

L'enseignement est légitimé par sa compatibilité avec une culture scientifique et sociale dont le rapport au savoir détermine la transposition didactique (Chevallard et Joshua, 1991). Ce rapport est défini par l'interprétation que la noosphère fait de ce savoir ainsi que par la vision contextuelle (les caractéristiques des élèves, le matériel disponible, les caractéristiques du milieu scolaire) et la vision identitaire de l'enseignant (son expérience, ses valeurs personnelles) (Karwera, 2012, p. 75). Toutefois, « le savoir que produit la transposition

didactique sera donc un savoir exilé de ses origines, et coupé de sa production historique dans la sphère du savoir savant, se légitimant, en tant que savoir enseigné, de n'être d'aucun temps ni d'aucun lieu, et de ne pas se légitimer par le recours à l'autorité d'un producteur quel qu'il soit » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 16).

Chevallard et Joshua (1991) mettent en garde contre un vieillissement du savoir qui peut le rendre illégitime. Ils distinguent le vieillissement « moral » du vieillissement « biologique » du savoir. Le vieillissement moral est évité quand le délai de la transposition didactique, ou DTD, demeure relativement court. Ce concept défini par Quessada (2008) et Quessada et Clément (2013) désigne « le temps qui sépare l'émergence d'un concept dans la communauté scientifique et son apparition dans les programmes scolaires (DTDp) ou dans les manuels scolaires (DTDm) » (p. 110). Le vieillissement biologique est évité quand le savoir scolaire est mis à jour en fonction de l'évolution du savoir savant et de l'évolution des approches didactiques.

Dans ce qui suit, quelques conditions de la réussite de la transposition didactique sont présentées.

Réussir la transposition didactique

La transposition didactique est essentielle à tout « fonctionnement didactique du savoir » qui se distingue du « fonctionnement savant de ce savoir » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 22).

Dans le cadre de la transposition didactique, le savoir savant et les pratiques sociales de références, sont « largement reconstruits et axiomatisés, en fonction de besoins didactiques et sociaux » (Astolfi, 2008, p. 185). Par ailleurs, Chevallard (1997) et Astolfi (2014) dénoncent les curriculums dans lesquels le contrat social domine le contrat didactique. Réussir la transposition didactique consiste, selon Astolfi et al. (2008), à respecter cinq règles : 1) Une révision continue du savoir scolaire pour le moderniser ; 2) Un évitement de l'obsolescence du savoir ; 3) Une création de liens entre le nouveau savoir et l'ancien à travers des savoirs réorganisés pour assurer leur continuité ; 4) Une possibilité de concevoir des activités pratiques à partir du savoir à enseigner ; 5) Un enseignement efficace qui aide à prévoir les difficultés des élèves.

La transposition didactique est un long processus de manipulation transformant le savoir savant en savoir enseigné. Cependant, ce savoir enseigné subit des modifications subjectives par l'élève, qui transforme le savoir enseigné en savoir acquis, qui sont les connaissances de l'élève.

2.3.3 L'enseignement de la mole

Entre les années 1970 et 1980, les perspectives constructivistes ont influencé les recherches portant sur l'enseignement de la mole. Ces études portaient surtout sur l'adéquation entre le développement cognitif de l'élève et les propositions du curriculum. Ces études comportaient peu de recommandations pour l'enseignement du concept. Pendant ces années, un intérêt particulier était porté à l'enseignement exploitant des logiciels. De nombreux chercheurs ont vérifié les effets de logiciels sur l'apprentissage de la mole. Ils ont constaté que, grâce à ces logiciels, les élèves étaient capables de mener correctement les calculs en dépit de la complexité des problèmes proposés. Certaines études portaient sur l'effet de l'utilisation de ces logiciels dans l'acquisition de la stœchiométrie. Dans ces cas, elles ont aussi montré que les élèves menaient à terme leurs calculs. Cela dit, des élèves bien entraînés à se servir de logiciels pourraient résoudre correctement les problèmes sans avoir compris le sens du concept (Fang et al., 2016).

Fang et al. (2016) distinguent la nature quantitative de la nature conceptuelle de la mole. Un élève qui a développé des compétences en mathématiques est capable de calculer une quantité de matière en appliquant les formules. Mais il n'a pas nécessairement appréhendé la nature conceptuelle de la mole ; autrement dit, l'élève n'a pas nécessairement compris l'existence du monde sous-microscopique et du monde macroscopique et il n'a peut-être pas saisi que le concept de mole crée le lien entre ces deux mondes. Les chercheurs mettent donc en garde contre un enseignement qui met l'accent sur une transmission passive des modèles théoriques.

Furió et al. (2002) confirment, en se basant sur plusieurs recherches, que le concept de mole présente des difficultés qui peuvent être surmontées si l'enseignement traditionnel est remis en question. Ils montrent que l'enseignement avec des modèles concrets favorise un apprentissage efficace du concept. Dans le cas particulier du concept de mole, ils montrent que

l'enseignement du concept pourrait être planifié de trois façons différentes : 1) en hiérarchisant les concepts ; 2) en plaçant l'accent sur l'aspect quantitatif du concept dans le calcul stœchiométrique ; 3) en utilisant des analogies ou des simulations informatiques. Furió et al. (2002) trouvent que les résultats des recherches qui se sont intéressées aux préalables de l'enseignement de ce concept, confirment que : 1) l'élève doit être capable de trouver un lien entre une masse et un nombre ; 2) l'élève doit comprendre la masse molaire avant de l'utiliser ; 3) une appropriation claire du concept d'atome serait un acquis déterminant pour le concept de mole.

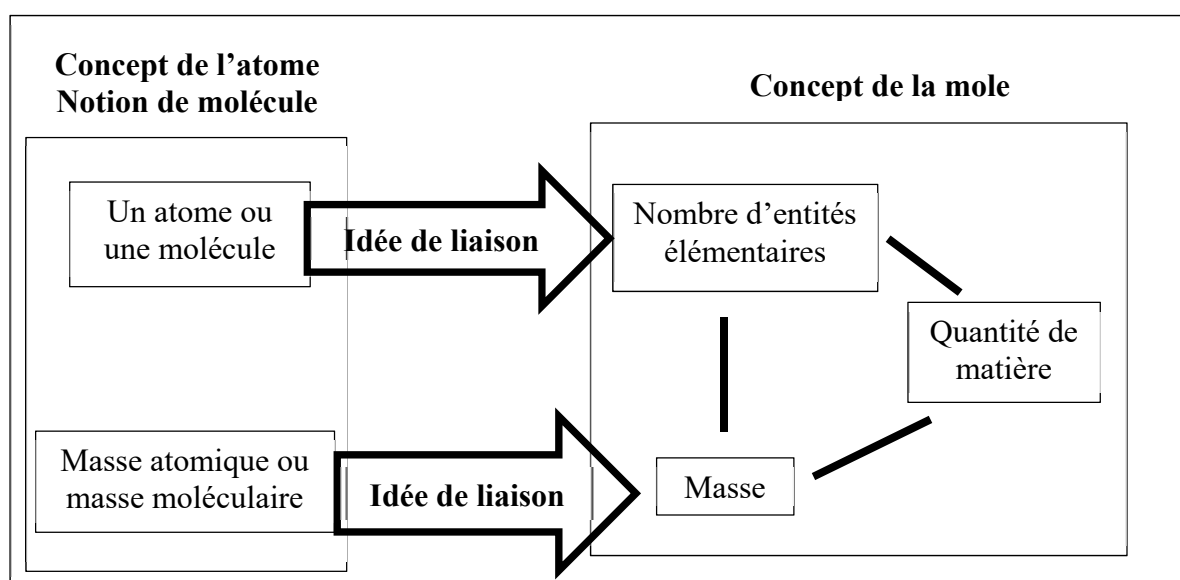


Figure 5 : La carte conceptuelle de la mole (Fang, Hart et Clarke, 2014, p. 354 / 2016, p. 186)

Fang et al. (2014/2016), Furió et al. (2002) et Kolb (1978) distinguent deux aspects du concept mole : un aspect nombre et un aspect masse. Chacun de ces deux aspects devrait être acquis par l'élève, qui a aussi besoin de créer un lien entre ces deux aspects pour construire les modèles théoriques. La carte conceptuelle (figure 5) créée par Fang et al. (2014/2016) montre les deux aspects du concept et leur domaine. Selon cette carte, les concepts d'atome et de molécule sont des prérequis au concept de mole. La séquence d'enseignement vise d'abord l'acquisition du nombre (la mole correspond à un groupement d'entités chimiques équivalent au nombre d'Avogadro), porte ensuite sur les liens entre la masse de l'entité (masse atomique

ou masse moléculaire) et la masse molaire, et propose ensuite à l'élève de construire des modèles théoriques mettant en lien les deux aspects.

L'apprentissage est, entre autres, un développement des capacités de l'élève à distinguer divers concepts. Il pourra d'autant mieux y parvenir qu'il aura compris dans quels contextes les concepts sont pertinents. Le profil conceptuel d'un concept scientifique est composé de zones dont chacune représente une façon particulière de voir et de comprendre ce concept (Mortimer, 1995).

Il y a deux étapes importantes dans un processus d'apprentissage. Dans un premier temps, l'enseignant joue un rôle très important pour guider, orienter et amener les élèves à comparer leurs propres représentations avec les concepts et théories scientifiques. Dans un deuxième temps, l'élève raffine sa compréhension du concept, ce qui enrichit sa « conscience disciplinaire » de la discipline dans laquelle se situe ce concept et lui permet de développer un « profil conceptuel » (Mortimer, 1995 ; Mortimer, Scott, Do Amaral et El-Hani, 2014). Dans le contexte de l'apprentissage du concept de mole, l'enseignant doit, au premier temps, guider l'élève et lui permettre de verbaliser ses idées au sujet des concepts reliés (particules, atomes, molécules, entités, nombre, masse, etc.) ; au deuxième temps, l'enseignant permet à l'élève non seulement de comprendre l'aspect masse et l'aspect nombre mais de comparer et de verbaliser sa compréhension de chacun des aspects (Fang et al., 2016). Par conséquent, l'élève développe des schèmes cognitifs pertinents ; l'élève s'approprie les différentes parties de la définition de la mole (l'unité, le nombre d'Avogadro, la masse) en créant des liens entre elles.

Comme décrit jusqu'à présent, le concept de mole est complexe de point de vue de ses définitions multiples et des liens qu'il tisse entre les domaines sous-microscopique et macroscopique. Dans ce qui suit, une analyse didactique du concept fait le point sur cette complexité.

2.3.4 Analyse didactique du contenu

Dans le cadre de la recherche présente, des analyses des productions des élèves et des enseignants étaient prévues avant et après la formation des enseignants. Ces productions sont des tests administrés aux élèves et des fiches de préparations présentées par les enseignants. Divers liens entre les représentations des enseignants au sujet du concept de mole et les erreurs

des élèves ont été identifiés. Une analyse didactique préalable du contenu a été très utile pour mieux décrire, comprendre et prévoir ces liens. Cette analyse didactique du contenu, présentée ci-dessous, comporte : les concepts de chimie et de mathématiques en lien avec l'apprentissage de la mole ; les difficultés d'apprentissage relatives à chaque concept ; l'explication de chacune de ces difficultés et les moyens à adopter pour un meilleur enseignement. Cette analyse peut être considérée comme une synthèse des sections précédentes portant sur l'enseignement et l'apprentissage de la mole.

Concept	Difficultés	Explication des difficultés	Moyen adopté pour un meilleur enseignement
<p>1- L'atome : <i>Au début de l'apprentissage du concept de mole, l'élève doit calculer le nombre de mole d'atomes. Acquérir le concept d'atome en appréhendant l'échelle sous-microscopique est déterminant pour un apprentissage efficace du concept de mole.</i></p>	<p>L'atome est la plus petite entité chimique qui constitue la matière.</p>	<p><u>Difficulté due à la dualité des domaines du savoir en chimie</u> L'élève perçoit la matière, par ses sens, comme étant continue. Il n'appréhende pas l'abstraction du monde sous-microscopique : la matière, selon lui, ne peut pas être faite de particules infiniment petites dont les propriétés ne sont pas celles de la matière à l'échelle macroscopique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des analogies structurelles les mieux adaptées (grains de farine, grains de sable, etc.). • Visualiser des simulations des échelles de l'univers. • Éviter les analogies de l'échelle macroscopique (balles, billes, etc.).
<p>2- La mole <i>Construire une séance d'enseignement de ce concept qui réduit les obstacles didactiques est l'un des objectifs à atteindre dans le cadre de cette recherche. Ce concept, pose des difficultés dues à la dualité des deux domaines, sous-microscopique et macroscopique, au langage symbolique et aux définitions des notions souvent mal vulgarisées en enseignement.</i></p>	<p>La molécule est un assemblage d'atomes liés par des liaisons covalentes.</p>	<p><u>Difficulté linguistique</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • C'est une difficulté phonétique : Certains élèves confondent <i>mol</i> et <i>molécule</i>. • Les élèves ayant des difficultés linguistiques en français auront de la difficulté avec ce vocabulaire. Une mole de molécules serait alors une molécule. 	<p>Commencer par utiliser des termes familiers dans le domaine de référence et œuvrer à leur remplacement durant le transfert au domaine cible. Écrire chacun des mots au complet en évitant les abréviations. Certains enseignants, risquent de consigner <i>mol</i> ou <i>mole</i> pour désigner la molécule ou avoir une écriture mal soignée du mot molécule durant leur exposé. Ils ne se rendent pas compte de la confusion langagière chez les élèves.</p>
	<p>La mole est une quantité de matière.</p>	<p><u>Conception résultante</u> En physique, la masse est une quantité de matière. En chimie, l'expression « quantité de matière » est utilisée dans les exercices pour désigner le nombre de moles. L'élève risque de confondre la masse et la mole et donc de considérer que 1 g est 1 mol. Certains pourraient éviter de créer des liens interdisciplinaires (la masse sera abordée uniquement en physique et la mole en chimie). L'élève est alors incapable de retrouver la relation entre la masse et le nombre de mole.</p>	

2-La mole (suite)	Le nombre d'Avogadro est $6,023 \times 10^{23}$.	<p><u>Difficultés dues au nombre d'Avogadro</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • L'élève a de la difficulté à hiérarchiser des nombres très grands. • L'élève risque de considérer 6,023 et l'exposant de 10 comme deux nombres indépendants, sans toutefois réaliser le sens de l'exposant 23. • Le nombre décimal 6,023 laisse l'élève dans une confusion : est-ce qu'il y a 0,023 atome ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Considérer le nombre d'Avogadro approximatif : 6×10^{23}. • Remédier à la difficulté de la hiérarchisation au secondaire est relativement tard ! Toutefois, l'utilisation des analogies où le nombre de grains n'est pas facile à compter pourrait mettre l'élève devant un conflit cognitif et lui faire appréhender l'utilité d'un regroupement en utilisant un nombre de particules élevé.
	Le symbole du nombre d'Avogadro est N_A .	<p><u>Difficulté due au langage symbolique</u></p> <p>Les élèves risquent de confondre ce symbole avec le symbole de l'élément sodium (Na), les deux symboles étant épelés par les mêmes lettres. En plus, le symbole de l'élément sodium est bien acquis avant l'introduction du symbole du nombre d'Avogadro.</p>	Dire le terme complet « Nombre d'Avogadro » et épeler les lettres en précisant qu'elles sont en majuscules et le « A » en indice.
	La mole est un ensemble constitué d'un nombre d'Avogadro d'entités.	<p><u>Difficulté due à la dualité des domaines en chimie</u></p> <p>Un raisonnement formel doit aider à penser le monde sous-microscopique qui est abstrait. Mais l'élève a la difficulté à distinguer le domaine sous-microscopique du domaine macroscopique.</p>	Enseigner en utilisant des analogies pertinentes permettant de modéliser chacun des deux domaines et la création de liens entre ces deux domaines. Par exemple, il faut éviter les analogies comme douzaine et dizaine d'œufs, de crayons. Ces nombres font référence à l'échelle macroscopique.

2-La mole (suite)	A, le nombre de masse, est égal au nombre des nucléons. ⁷	<p><u>Difficultés dues aux définitions et à la dualité des domaines du savoir</u></p> <p>La masse d'un atome est proposée dans les manuels et les fiches de préparation comme un dogme : $m = A$ u.m.a. A étant nommée nombre de masse, l'élève en déduit que A est la masse.</p> <p>L'élève risque de ne pas appréhender l'unité u.m.a ; il considère alors que la masse de l'atome est A en g.</p> <p>Dans certains manuels et pour certains enseignants, « la masse de l'atome est A u.m.a et la masse molaire est A g » un dogme qui mène l'élève dans une confusion totale des domaines du savoir en chimie. Dans ces conditions, il confond la masse atomique et la masse molaire, et ne distingue pas le monde sous-microscopique et le monde macroscopique.</p>	Préférer dire : « A » nombre de nucléons. Donner la masse molaire en hypothèse sans créer des liens avec le nombre de masse. ⁸
	La masse de l'atome est concentrée dans son noyau ; elle est égale à la masse des nucléons.		
	La masse d'un nucléon est 1 u.m.a		Les masses molaires sont données explicitement dans les énoncés : Masse molaire du ... est ... g/mol ou g.mol ⁻¹

⁷ Le calcul de masse molaire ou de masse atomique et la définition de l'unité u.m.a ne sont pas abordés dans le cadre de cette recherche.

⁸ C'est une considération pour cette recherche : dans les activités construites, les enseignantes donneront les masses molaires.

<p>3- La proportionnalité <i>Le modèle théorique associé au concept la mole est la proportionnalité. Toutefois, les manuels proposent d'une façon dogmatique les formules sans amener l'élève à construire ces modèles. Dans les formules</i></p> $n_{mol} = \frac{\text{nombre d'atomes}}{\text{Nombre d'Avogadro}}$ <p>Ou</p> $n_{mol} = \frac{\text{masse de l'échantillon}}{\text{Masse molaire}}$ <p><i>l'élève ne retrouve pas une proportionnalité mais des fractions ce qui le ramène à la notion de partage.</i></p>	<p>Le nombre de mole d'atomes dans une substance est proportionnel à la masse de ces atomes.</p>	<p><u>Difficultés dues aux mathématiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • L'élève considère la fraction en tant que partage ; les formules proposées pour calculer le nombre de mole ne peuvent pas désigner un partage. • L'élève considère que la fraction est un partage et donc que le numérateur est toujours supérieur au dénominateur. Donc pour calculer le nombre de mole de 1 g de potassium dont la masse molaire est 39 g.mol⁻¹ ne peut pas être 1/39 (1<39 ; 1 ne peut pas être partagé à 39). Il risque de poser la réponse 39. • Parfois l'élève réussit à calculer correctement mais l'obtention d'un nombre décimal le mène à douter de son calcul : pour lui un nombre de mole doit être un entier. Pour lui le paquet n'existe pas. 	<p>Construire des activités où l'élève manipule pour créer un nombre décimal de paquets. Par exemple, peser une masse qui correspond à 3,5 mol ; l'élève doit retrouver que 3,5 correspond à 3 paquets et une moitié de paquet.</p>
	<p>Le nombre de mole est le rapport du nombre d'atomes sur le nombre d'Avogadro.</p>	<p>Les élèves n'appréhendent pas les exposants de 10. 6,023x10²³ est considéré 6,023. Dans ce cas l'élève pourrait faire plusieurs erreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ne pas considérer les exposants de 10 dans son calcul. - Ne pas appréhender le partage dans des rapports comme : $\frac{4 \times 10^{23}}{6 \times 10^{23}}$ car 4 < 6 ou même $\frac{4 \times 10^{24}}{6 \times 10^{23}}$ car 4 < 6 (il ne considère pas les exposants de 10). - Dans ce cas l'élève confond les deux masses et procède à une identification des variables selon les unités (g en haut et g/ mol en bas). - Le terme « masse molaire » ou l'unité g.mol⁻¹ le mène à une confusion alors que g/mol prononcé « g par mol » rappelle à certains qu'il s'agit de la masse d'une mole ; un langage qui facilite le processus de calcul correct. 	<p>Durant l'enseignement de ce concept, dresser un tableau de proportionnalité serait plus pertinent que d'appliquer une formule. Les titres des colonnes et des lignes rappellent à l'élève le langage et situent le calcul par rapport à des variables. En plus, dans ce tableau, la masse d'une seule mole est consignée clairement alors qu'elle semble plus implicite dans le rapport de la masse sur la masse molaire.</p>
		<p>L'élève ne sait pas calculer la masse ou le nombre d'atomes s'il a le nombre de mole. Le numérateur et le dénominateur sont considérés comme deux nombres entiers indépendants. En plus, il cherche à avoir un nombre entier aussi grand que le nombre d'Avogadro, il procède par un calcul adapté à son système explicatif.</p>	

Tableau 3 : Analyse didactique du contenu

2.4 Le développement professionnel des enseignants

L'enseignant est l'acteur principal de la transposition didactique interne qui transforme le savoir présenté dans les programmes d'études et les manuels en un savoir enseigné (Clerc et al., 2006). Ainsi doit-il créer les conditions matérielles, humaines et psycho-sociales pour favoriser l'apprentissage (Bru, 2001, p. 7). Pratiquer le métier d'enseignant consiste alors à déployer des compétences relatives à des pratiques sociotechniques et à des pratiques d'enseignement (Martinand, 1993). Le développement de ces compétences constitue la visée essentielle des activités de formation continue.

2.4.1 L'effet- maitre

« Sous sa forme statistique, l'effet-maitre est un résidu, c'est-à-dire la différence entre les classes une fois contrôlées les caractéristiques des élèves » (Bressoux, 2001). Les caractéristiques des élèves sont de deux types : les caractéristiques globales, comme le nombre d'élèves, ainsi que le nombre et le type de cours, et les caractéristiques contextuelles de nature socio-culturelle. Évaluer l'effet-maitre consiste à mesurer l'efficacité de l'enseignant, celle-ci étant « la capacité à élever le niveau moyen d'une classe » (Bressoux, 2001, p. 39). C'est trouver la différence entre les acquisitions des élèves en fin d'année et les acquisitions initiales (Bressoux, 2001). Quand cette mesure peut être faite sur des groupes d'élèves ayant des caractéristiques similaires, elle est considérée comme étant plus fiable.

L'efficacité de l'enseignement sur l'apprentissage des disciplines scientifiques est influencée par le statut socioprofessionnel des parents mais elle est essentiellement due à l'effet-maitre : les enseignants exigeants provoquent les meilleurs apprentissages. Ceci étant surtout observé dans les milieux défavorisés où la classe est le premier lieu d'apprentissage des disciplines scientifiques, le milieu familial offrant plutôt un bain linguistique (Bressoux, 1994/2001/2008 ; Gauthier et Dembélé, 2004 ; Hattie, 2009).

L'effet-classe est la somme de l'effet-maitre, des caractéristiques globales et des caractéristiques contextuelles. Les recherches montrent que les apprentissages des élèves

dépendent en grande partie de l'effet-maitre (Bressoux, 2001 ; Bru, 2001), auquel s'ajoute un effet-établissement.

Marlot et Toullec-Therry (2014, p. 10-20) suggèrent que l'analyse de situations d'enseignement et d'apprentissage doit considérer différents niveaux : le niveau micro qui concerne des moments déterminés des situations, le niveau méso relatif à la description de la situation et aux représentations de l'enseignant, et le niveau macro relatif à l'environnement scolaire. Dans la présente recherche, une analyse didactique des domaines micro et méso a été effectuée.

L'efficacité de l'enseignement étant le principal déterminant de l'efficacité de l'apprentissage (Organisation de coopération et de développement économique, [OCDE], 2014), les recherches en pédagogie et en didactique se sont toujours intéressées à faire ressortir des liens entre la méthode d'enseignement et les résultats des élèves. De nos jours, les méthodes et les résultats de certaines de ces recherches sont pris en considération pour étudier l'effet-maitre et les pratiques enseignantes, et pour les améliorer (Bru, 2002, p. 64).

2.4.2 La pratique enseignante

La pratique enseignante est « un processus interactif situé » (Altet, 2002, p. 86) qui évoque une situation singulière au cours de laquelle interagissent un enseignant et des élèves qui communiquent au sujet d'un savoir. Ce processus met en jeu « la dimension interactive de la communication et la dimension finalisée de l'apprentissage » et « fonctionne comme un travail interactif d'ajustement, de négociations, de transactions, et de compromis » (Altet, 2002, p. 87).

Étudier les pratiques enseignantes consiste à tenir compte des représentations de l'enseignant « de soi, de la tâche, des autres et du contexte [...]. Ces quatre composantes déterminent la signification de la situation pour les sujets, et par là induisent les comportements, les démarches cognitives et le type de relation interindividuelles et intergroupes » (Bru et Talbot, 2001, p. 14). « Les pratiques d'enseignement observées en classe et visant l'apprentissage font partie intégrante des pratiques enseignantes qui englobent aussi les représentations citées » (Bru et Talbot, 2001, p. 17). La présente recherche s'est penchée sur les représentations disciplinaires de l'enseignant, sur leur évolution et sur le développement des pratiques enseignantes.

Sarremejane et Lémonie (2011, p. 286), de leur côté, distinguent 1) le comportement observable dans le déroulement de l'action et dans son résultat, 2) les déterminants structurels qui sont des processus cognitifs implicites à l'action, et 3) les signifiants dans le biais pratique et le biais linguistique. L'épistémologie des pratiques enseignantes peut être définie selon ces trois dimensions (comportementale, structurelle et signifiante).

2.4.3 L'épistémologie de l'enseignant

L'enseignant est l'acteur principal de la transposition didactique interne. Il partage avec ses collègues des représentations sociales communes, mais son enseignement reflète sa personnalité, son expertise et son environnement (Tavignot, 1995), ce que Paun (2006, p. 8) nomme son « habitus professionnel ». En d'autres termes, son « histoire personnelle » et son insertion dans le métier résultent de la « socialisation d'une expérience très singulière » (Altet, Paquay et Perrenoud, 2002). Cette expérience personnelle détermine la transposition didactique interne, soit la façon dont chaque enseignant transforme et adapte le savoir à enseigner (Karwera, 2012).

Les pratiques professionnelles sont définies par les pratiques d'enseignement, les pratiques formalisées (les activités entre les enseignants ou entre enseignants et autres acteurs de l'établissement), les pratiques informelles (en récréations, en temps libre), les pratiques de surveillance, les pratiques professionnelles hors de l'école (préparations) et les pratiques d'animation. Elles constituent un sous-système du système « école » et interagissent avec tous les autres sous-systèmes dans une même « culture pédagogique » d'établissement (Bru et Talbot, 2001, p. 11).

Cette recherche s'est particulièrement intéressée aux représentations des enseignants concernant le concept de mole et son enseignement ainsi qu'à l'évolution de ces représentations durant une formation qui sollicite un travail d'équipe et des compétences de gestion didactique de la classe. Il s'agissait essentiellement d'engager les enseignants dans un travail d'équipe pour partager des connaissances professionnelles incluant des connaissances disciplinaires et des connaissances en acte afin de construire une séquence d'enseignement efficace du concept de mole. L'institution, représentée par la directrice de l'école, a confirmé, dans le cadre d'obtention du certificat d'éthique (voir Annexe 1), son acceptation et son encadrement de la recherche. En

d'autres termes, cette formation est conforme à la culture pédagogique de l'établissement. La recherche s'intéresse alors au sous-système des pratiques d'enseignement.

Par ailleurs, toute réalisation didactique repose sur trois phases qui dépendent de chaque enseignant : 1) planifier la chronogenèse (« l'organisation chronologique des objets de savoir » (Reuter et al., 2013, p. 23)), 2) produire le texte du savoir et organiser la topogenèse (« l'ensemble des opérations qui organisent les différents « lieux » occupés par les acteurs de la relation didactique et les résultats de ces opérations, c'est-à-dire l'organisation des différents espaces » (Reuter et al., 2013, p. 217)) et 3) organiser la situation d'apprentissage. La réussite de cette réalisation didactique dépend du rapport de chacun des acteurs (enseignant et élève) au savoir (Mercier, 2002).

L'enseignant professionnel possède des pratiques réfléchies, intentionnelles, différenciées et adaptées aux élèves. Il est habile à montrer à ses élèves qu'il comprend leur perspective ; il les aide à comprendre le contenu disciplinaire et la façon d'interagir avec les autres ; il peut aussi les aider à s'auto-évaluer. Enseigner avec professionnalisme consiste alors à créer des situations favorables à l'apprentissage qui permettent aux élèves de s'approprier le savoir et de remédier à leurs lacunes par des stratégies adaptées (Hattie, 2009). Cela signifie que l'enseignement dépasse les préoccupations liées à la seule maîtrise du contenu et se caractérise par un grand niveau d'implication dans l'acte d'enseigner (Hattie, 2009 ; Potvin, 2011) et par la volonté de faire construire un rapport positif à la discipline par les élèves (Hattie, 2009).

Les représentations de l'enseignant issues de facteurs personnels et collectifs, les activités qu'il pilote en classe et le discours qu'il tient dans son enseignement définissent ce que Brousseau (2006) appelle « l'épistémologie spontanée des professeurs » mais plus précisément « l'épistémologie pratique » dont traitent Marlot et Toullec-Therry (2014, p. 8). D'une part, « c'est une épistémologie dans le sens qu'il s'agit de la théorie de la connaissance de l'enseignant, issue des connaissances qu'il a construites au cours de sa formation et de son expérience professionnelle, sur le métier, les savoirs à enseigner, la difficulté scolaire, etc. » (Marlot et Toullec-Therry, 2014, p. 8). D'autre part, elle est ancrée dans les pratiques pour les adapter aux besoins au fur et à mesure qu'ils se manifestent. Les éléments qui identifient cette épistémologie peuvent être divisés en deux catégories : les éléments qui préexistent à la situation et ceux qui sont sélectionnés par la situation. Toutefois, l'épistémologie des pratiques est

dialectique dans le sens où elle oppose et unit l'individu et le collectif (Marlot et Toullec-Therry, 2014).

Comme il en a été question dans la problématique, la formation initiale des enseignants ne leur permet pas de développer des représentations pertinentes du concept de mole dont ils ne connaissent souvent que l'aspect opératoire. En plus, l'histoire de ce concept est problématique et laisse l'enseignant confus devant un grand nombre de définitions controversées. Cette recherche visait, en partie, une évolution des représentations des enseignants au sujet du concept de mole.

L'épistémologie de l'enseignant est la résultante des représentations personnelles de l'enseignant et des représentations du collectif. Dans ce qui suit, l'accent est placé sur les représentations ou conceptions naïves des enseignants.

2.4.4 Les conceptions naïves des enseignants

La formation initiale d'un enseignant ne lui permet pas toujours de définir sa propre stratégie d'identité professionnelle. En effet, il arrive souvent qu'un enseignant novice s'identifie à un enseignant aux méthodes traditionnelles rencontré durant son parcours académique, relègue à l'arrière-plan les principes acquis durant sa formation initiale et se contente d'un enseignement transmissif (Hattie, 2009 ; Minier et Gauthier, 2006). Pour se justifier, l'enseignant évoque parfois un manque de maturité des élèves qui les rend, selon lui, incapables de s'investir dans la construction du savoir (Karwera, 2012).

Altet (2002), ainsi que Sarremejane et Lémonie (2011), décrivent l'évolution des paradigmes d'enseignement qui sont passés du processus-produit, au processus-médiateur, à l'écologique, à l'expérimental puis au systémique. Le processus-produit consiste donner à l'enseignant une liste de manœuvres à exécuter. Le processus médiateur est un modèle cognitiviste qui se penche plus sur l'analyse des productions de l'enseignant. Le modèle écologique traite l'enseignement en situation classe. Les modèles expérimental et systémique consistent à considérer l'enseignant, l'élève et la situation durant l'enseignement et l'apprentissage. Sans entrer dans le détail de ces paradigmes, il est intéressant de signaler que de nombreux enseignants, autant des enseignants expérimentés que des enseignants novices, préfèrent encore les paradigmes les plus simples, comme celui du processus-produit, selon

lequel l'enseignant joue un rôle technique qui consiste à exécuter des tâches définies par d'autres, ou celui du processus-médiateur, selon lequel l'enseignant joue un rôle assez vague de « guide » et délaisse parfois la complexité des savoirs (Altet, 2002 ; Sarremejane et Lémonie, 2011).

La posture constructiviste requise pour une pratique d'enseignement adéquate ne découle donc pas nécessairement des enseignements reçus pendant la formation initiale et les « sciences de l'éducation doivent interroger les savoir-faire effectifs des enseignants » face aux recommandations socioconstructivistes (Bru et Talbot, 2001, p. 19). Certaines recherches en didactique se sont intéressées à la façon de provoquer, chez les enseignants, un changement conceptuel qui puisse avoir un impact sur leur modèle pédagogique.

2.4.5 Le modèle pédagogique de l'enseignant.

Le modèle pédagogique est une construction théorique qui rend compte de la « signification d'ensemble des éléments ou des pratiques observables » (Astolfi et al., 2008, p. 102). Il se distingue des méthodes pédagogiques et des moyens pédagogiques et se rapporte à l'épistémologie de l'enseignant décrite ci-dessus (Astolfi et al., 2008).

Il ne peut y avoir de description uniforme du modèle pédagogique car ce dernier témoigne de « l'histoire professionnelle » de l'enseignant (Bru, 2002). Pour déterminer ce modèle pédagogique, il faut aller au-delà de l'observable pour identifier des composantes abstraites qui sont : une composante psychologique définie par les représentations que l'enseignant se fait de l'apprentissage ; une composante épistémologique qui met en relief le rapport de l'enseignant au savoir ; une composante psycho-sociale déterminée à partir de l'observation de la gestion de classe ; une composante axiologique qui témoigne des finalités, des valeurs et de la vision de l'enseignement ; une composante psycho-personnelle précisant l'autorité de l'enseignant et son rapport à l'institution.

Astolfi et al. (2008) s'inspire des travaux de Dunod (1983) pour identifier trois modèles pédagogiques possibles de l'enseignant. Ces modèles pourraient être développés durant les pratiques d'enseignement ou durant des formations. Le tableau 4 explicite les modèles pédagogiques que peut développer une formation : le modèle centré sur l'acquisition, le modèle centré sur la démarche et le modèle centré sur l'analyse. La présente recherche a débuté par une

identification du modèle pédagogique de chacune des enseignantes participantes. Elle visait ensuite à développer ou à consolider chez l'enseignante le modèle centré sur l'analyse.

	Modèle centré sur les acquisitions	Modèle centré sur la démarche	Modèle centré sur l'analyse
Rapport au savoir	Appris.	Construit.	Analysé.
Logique par rapport à l'activité professionnelle	Logique externe.	Logique du détour.	Logique de prise de distance par auto-observation.
Rapport aux pratiques	Caractère systématique.	Pari antifonctionnaliste.	Production de sens.
Rapport théorie-pratique	La pratique est une application de la théorie.	La pratique se transfère d'une pratique à une autre sans passage par la théorie.	Un va-et-vient entre théorie et pratique pour réguler.

Tableau 4 : Les trajets de la formation (inspiré des travaux de Dunod, 1983, dans Astolfi et al., 2008)

Développer un modèle pédagogique consiste, entre autres, à favoriser l'appropriation de connaissances professionnelles par l'enseignant. Des recherches en didactique se sont intéressées à l'évolution du concept de connaissances professionnelles.

2.4.6 Les connaissances professionnelles

La formation des enseignants est l'un des volets de la recherche en didactique. L'observation des enseignants dans leur pratique d'enseignement et l'analyse des situations ont abouti à la construction de certains concepts au sujet de l'élaboration d'un savoir professionnel qui a pour origine la pratique et qui évolue avec l'expérience d'enseignement. Chacun de ces concepts a été problématisé et étudié dans des formations professionnelles. Parmi ces concepts seront explicités ci-dessous : *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) proposé par Shulman (1986) ; les connaissances professionnelles locales (Morgue, 2003a) ; les connaissances professionnelles didactiques locales (Morgue, 2008) ; les savoirs pratiques professionnels

(Porlan, Azcarate et Martin, 1998) ; les références interdisciplinaires à la base de compétences professionnelles des enseignants (Duit, 2007). Les recherches s'intéressent aussi, de plus en plus, à la diffusion des nouvelles pratiques et à l'efficacité des dispositifs de formation (Boilevin, 2013, p. 119).

Pedagogical Content Knowledge (PCK)⁹

Selon Shulman (1986), l'enseignant doit maîtriser trois types de connaissances : des connaissances du contenu disciplinaire, des connaissances du contenu pédagogique et des connaissances du contenu curriculaire. Shulman précise que l'enseignant 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'il 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 qui rendent le contenu disciplinaire enseignable. Parmi ces connaissances qui forment le *Pedagogical Content Knowledge (PCK)*, se trouvent notamment les conceptions alternatives des élèves, des méthodes variées pour enseigner les principaux concepts ainsi que le contenu du matériel didactique.

Les connaissances professionnelles locales

Les connaissances professionnelles locales sont définies par Morgue (2003a) comme étant des connaissances construites lors des pratiques d'enseignement. Elles peuvent être théoriques, en rapport avec une conception a priori de la séance, ou empirique, en rapport avec la réalisation effective de la séance. L'appropriation de ces connaissances peut donc se faire en cours de formation professionnelle ou en cours de l'expérience du métier. Toutefois, l'application de ces connaissances est limitée à une séance déterminée et leur réinvestissement ne se fait que dans le cadre d'une nouvelle réalisation de cette séance. Par ailleurs, ces connaissances professionnelles locales favorisent l'évolution des pratiques enseignantes en ce qui concerne la planification, la gestion des activités et le temps d'une séance.

⁹ Dans ce qui suit l'acronyme PCK sera utilisé pour désigner les *Pedagogical Content Knowledge*.

Les connaissances professionnelles didactiques locales

Le *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) définit des connaissances professionnelles disciplinaires. Par exemple, enseigner l'électricité mobilise des connaissances professionnelles différentes de celles d'enseigner la mécanique. De même ces connaissances diffèrent selon l'ordre d'enseignement et le niveau scolaire où l'on enseigne. Le qualificatif « professionnel » est attribué à ces connaissances parce qu'elles sont construites durant les pratiques. Les connaissances professionnelles pédagogiques et didactiques locales (*Local Pedagogical Content Knowledge* ou LPCK), conceptualisées par Morgue (2008), sont plus contextualisées que le PCK : elles dépendent du contenu disciplinaire et de la séance animée. Ainsi, si le même contenu est enseigné durant deux séances différentes, le CPK est identique mais les LCPK sont différentes.

Ces connaissances peuvent être au cœur d'une formation dans laquelle une simulation croisée constitue l'outil principal. Par exemple, deux enseignants peuvent simuler ensemble une séance sur un même ordinateur. L'interaction entre les deux enseignants pour expliciter et argumenter leur action favorise la construction des LCPK.

Cette méthode de la simulation croisée a permis de montrer que les enseignants « expérimentés » mobilisent, en situation de simulation, des connaissances professionnelles pédagogiques et didactiques locales (formulation de consignes, interprétation des productions des élèves, formulation de traces écrites, etc.) acquises au cours d'une première réalisation de cette même séance. Les résultats montrent que ces connaissances professionnelles sont encore disponibles 2 mois et demi après leur acquisition.

Les savoirs pratiques professionnels

Les savoirs des enseignants sont de deux natures : les savoirs, qui sont surtout théoriques, en rapport avec le savoir disciplinaire et les savoirs, qui sont surtout pratiques, en rapport avec l'activité d'enseignement et qui illustrent la maxime « on apprend à enseigner en enseignant » (Porlan, Azcarate et Martin, 1998, p. 95). En effet, ces savoirs issus de la pratique d'enseignement ne peuvent émerger qu'en enseignant réellement dans une classe. Ces savoirs, qui vérifient le concept de « praxis » ou d'action fondée, sont le noyau du savoir professionnel. Ils ne sont pas disciplinaires mais influencés par la discipline ; ils ne sont pas identifiés avec

l'action mais par l'action. Porlan, Azcarate et Martin (1998) les nomment : les savoirs pratiques professionnels.

Les outils documentaires utilisés dans ce genre de formation présentent un savoir disciplinaire, les conceptions et les obstacles associés à ce savoir, ainsi que des aspects phénoménologiques qui explicitent l'action dans son contexte. Ces trois dimensions sont apparentes dans les pratiques réflexives s'interrogeant sur le quoi et le comment du contenu, d'une part, et sur le déroulement des séances d'enseignement d'autre part.

Les références interdisciplinaires à la base des compétences professionnelles des enseignants

Duit (2007, p. 4) modélise les connaissances et les compétences des enseignants 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 autres disciplines de références¹⁰. Ainsi, la maîtrise de la discipline enseignée ne suffit pas pour garantir un enseignement efficace. Par exemple, l'enseignant doit développer des compétences linguistiques pour conceptualiser et introduire le langage disciplinaire. Des compétences d'ordre psychologique et pédagogique sont également essentielles dans la gestion des séances d'enseignement.

Duit, comme d'autres auteurs avant lui, 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 et des compétences d'un enseignant de chimie doit être élaboré à travers des recherches en sciences de l'éducation qui comportent des dimensions pratiques, techniques et scientifiques. Le mode pratique est en rapport avec les 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. Cette articulation entre les trois modes favorise le développement professionnel de l'enseignant en le guidant à travers les innovations, en raffinant son raisonnement, en orientant ses intérêts selon les résultats de recherches, en clarifiant divers problèmes didactiques, en le mettant devant des défis, en encourageant les débats et en stimulant sa curiosité.

¹⁰ Les disciplines de référence comme : la sociologie, l'anthropologie, les langues, l'éthique.

Duit (2007) propose un modèle de reconstruction de l'enseignement qui respecte une épistémologie constructiviste et dans lequel il distingue : 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 ; 3) le développement et l'évaluation dans les classes réelles.

Dans le cadre de la présente recherche, le modèle de reconstruction de l'enseignement proposé par Duit (2007) a été appliqué puisque la formation comporte, d'une part, un volet théorique où l'épistémologie du concept est explicité et le contenu disciplinaire à enseigner est structuré en se basant sur des résultats de recherche en sciences de l'éducation ; d'autre part, un volet pratique où un travail d'équipe est mis en valeur pour planifier, piloter et évaluer une séquence d'enseignement du concept de mole. Les caractéristiques de cette formation visant le développement de connaissances et de compétences professionnelles des enseignants sont explorées ci-après.

2.4.7 La formation des enseignants

Les recherches en didactique confirment l'importance de repenser l'activité enseignante et de la faire évoluer pour qu'elle puisse s'adapter aux transformations et à l'évolution de la société (Glaserfeld, 1994). Le futur enseignant a besoin d'être entraîné à des pratiques réalistes : appliquer un curriculum, gérer une classe et adopter des démarches réflexives pour s'approprier des connaissances professionnelles.

Pour ce faire, les enseignants ont besoin d'un « référent, propre à étayer des décisions didactiques qu'ils ne norment pas » (Hubbermann 1989 , Tochon, 1989 cités par Astolfi et al., 2008, p. 7). Toutefois, ces référents ne peuvent être imposés mais doivent être construits durant des formations professionnelles où l'écart entre la communauté des chercheurs et celle des enseignants est réduit. Ce besoin pourrait mener à une nouvelle orientation de certaines recherches en éducation : créer l'équilibre entre l'évolution épistémologique, théorique et fondamentale de la science dans la communauté scientifique (pédagogues et didacticiens), les décisions de la noosphère (décideurs gouvernementaux) et les pratiques des enseignants (Weiss, 1997).

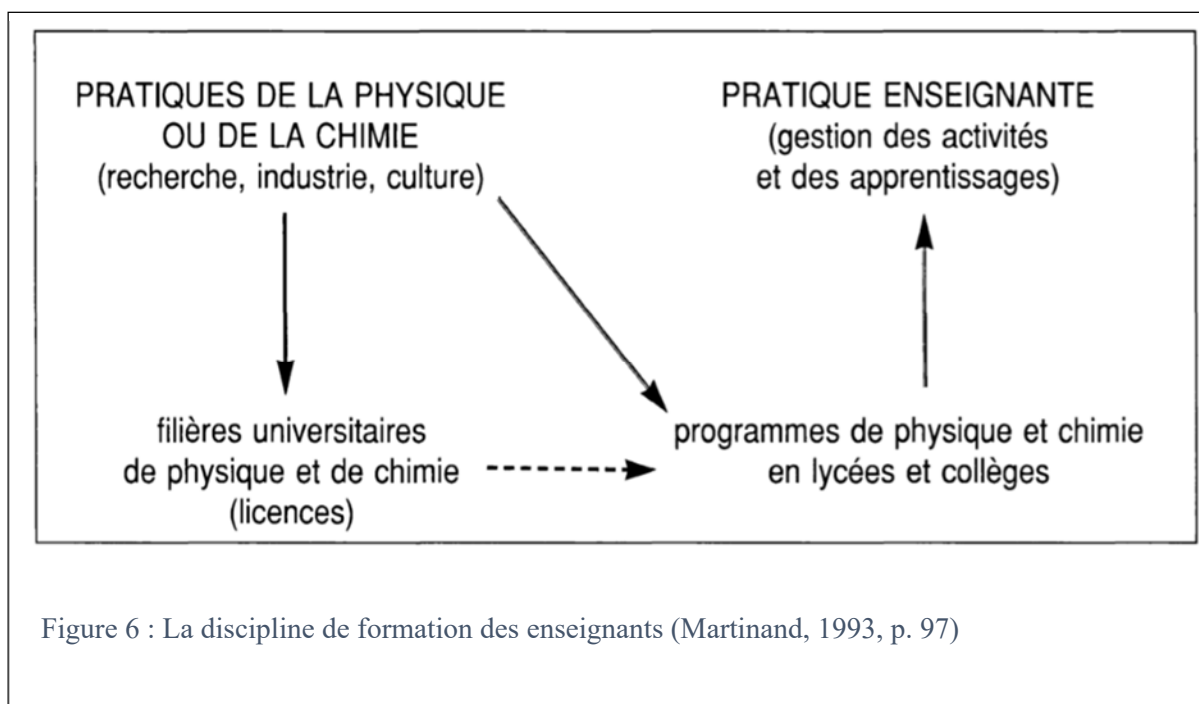
En didactique, depuis déjà plusieurs années, les recherches possèdent d'ailleurs une « visée praxéologique » (Bru, 2002) visant à installer de nouveaux dispositifs de formation pour améliorer et faire évoluer les pratiques en favorisant l'implication des enseignants. Cette mise en pratique des résultats des recherches définit une des orientations de la didactique : « la didactique critique et prospective » ; les deux autres orientations étant la didactique praticienne qui s'intéresse aux stages de pratiques des enseignants et la didactique normative qui s'attache à la conception et à l'analyse des programmes (Martinand, 1993).

Une bonne formation est « un processus dynamique (démarche de formation) qui propose des outils relativement construits (dispositifs de formation), tout en affirmant immédiatement qu'il sera bon de les subvertir (dispositifs ouverts) » (Astolfi et al., 2008, p. 10). Dans cette optique, quatre aspects sont fréquemment abordés durant une formation : 1) explicitation du modèle pédagogique de chacun ; 2) formalisation du modèle pédagogique de référence qui est celui du formateur ; 3) évolution du modèle initial à travers des activités et 4) interaction entre les formés pour développer des connaissances professionnelles. (Astolfi et al., 2008). Par exemple, les méthodes de simulation (Morgue, 2003a) et de simulation croisée (Morgue, 2008) adoptées en formation dans une démarche réflexive permettent l'appropriation de connaissances professionnelles que l'enseignant déploie en situation pratique.

Dans une activité de formation, il est préférable d'adopter « une théorie spiralaire du développement cognitif » en favorisant une interaction sociale qui n'est pas unidirectionnelle et qui encourage le déséquilibre intra-individuel à partir d'un déséquilibre interindividuel (Astolfi et al., 2008, p. 43). Ce processus socioconstructiviste appliqué en formation motive les formés à la fois dans une démarche de changement conceptuel disciplinaire et dans une démarche de changement des pratiques professionnelles (Peterfalvi, 1997).

La réussite d'une formation didactique implique qu'elle prenne l'allure d'une « aventure » pour tous les acteurs (formé et formateur) qui se retrouvent dans un « côte à côte ». La formation se vit alors dans un climat relationnel participatif, et aussi à l'aide d'une instrumentation utile qui conduit à des activités pertinentes. Ce type de formation se caractérise par une structure favorisant un processus dynamique d'évolution des pratiques professionnelles ; un homomorphisme entre les situations en formation et les situations didactiques ; une ouverture et une créativité du formé dans les futures prises de décisions didactiques (Astolfi et al., 2008, p. 7).

Martinand (1993) montre qu'une formation en didactique des sciences est une occasion de transfert entre diverses disciplines universitaires. Une explicitation des disciplines scientifiques telles que pratiquées et l'exercice du métier d'enseignant doivent être au cœur de la problématique de la formation. Le chercheur propose un modèle en enseignement de la chimie et de la physique (figure 6) où se situent les problèmes à soulever en formation. Selon lui, chaque rubrique et chaque flèche mérite d'être traitée. « Il s'agit d'abord de la formation de savoirs professionnels pour maîtriser la pratique enseignante » (Martinand, 1993, p. 97).



Réussir une formation consiste à engager l'enseignant dans un processus de développement de ses connaissances et de ses compétences professionnelles. Des exemples de dispositifs de formation efficaces sont décrits ci-après.

Boilevin (2013, p. 121) décrit l'élaboration d'un dispositif de formation articulant pratique et théorie qui vise le développement professionnel des enseignants. Les enseignants adoptent la démarche réflexive proposée par Morgue pour faire interagir changement conceptuel et changement de pratique en vue de construire leur savoir professionnel. Au cours des pratiques réflexives, les enseignants ont recours à des outils d'analyse provenant de diverses recherches. Les pratiques professionnelles sont traitées selon trois points de vue : épistémologique,

psychologique et communicationnel. Ce dispositif de formation respecte les principes décrits par Astolfi (2008). Dans le module de la formation, les interactions formateur-enseignant et enseignant-enseignant sont favorisées pour élaborer le savoir professionnel au sein de l'institution. A noter que pour augmenter l'efficacité de la formation, les outils peuvent être adaptés par les enseignants, des traces des conceptions initiales sont gardées et les acquis de la formation sont mis en pratique dans des séances d'enseignement.

Faire le métier d'enseignant ne se limite pas à couvrir le contenu des programmes. Dans le contexte actuel de programmes centrés sur l'apprentissage, les enseignants ont intérêt à réaliser que leur « effet-maitre » est déterminant dans l'apprentissage et à tenir compte des facteurs personnels, curriculaires, institutionnels et didactiques : 1) personnels puisque les pratiques enseignantes sont « “ un faire ” singulier, propre à chaque intervenant » (Lenoir, 2009, p. 12) ; 2) curriculaires car le savoir savant sélectionné, selon des conditions socio-économiques, est rédigé sous forme de programme ou de manuels scolaires ; 3) et 4) institutionnels et didactiques car c'est l'enseignant qui doit transformer ce savoir en activités constructivistes mobilisant les processus cognitifs des élèves, provoquant un changement conceptuel malgré des ressources humaines (techniciens, conseillers) et matérielles (matériel didactique et informatique, matériel de laboratoire) souvent très limitées. Les recherches en didactique s'ouvrent de plus en plus au terrain pour soulever les besoins essentiels et œuvrer à des formations dans des approches d'homomorphisme, de collaboration et de coopération. De telles formations entraînent un développement professionnel de l'enseignant en faisant évoluer ses modèles didactiques et ses connaissances professionnelles. La formation planifiée dans le cadre de cette recherche vérifie ces principes ; un modèle de la formation est décrit dans ce qui suit.

2.4.8 Le modèle de la formation

Comme précisé ci-dessus, la formation animée dans le cadre de la présente recherche satisfaisait au modèle proposé par Duit (2007), soit la reconstruction de l'enseignement. Selon ce modèle les enseignants doivent développer des connaissances professionnelles théoriques (soit l'épistémologie du concept) et pratiques réalistes (soit les compétences professionnelles). La formation est un processus dynamique favorisant l'identification et l'évolution du modèle

pédagogique de l'enseignant. La caractéristique principale de la formation est l'homomorphisme.

La figure 7 illustre le modèle de la formation planifiée dans le cadre de la présente recherche. Ce modèle comporte deux triangles didactiques. Un triangle (triangle de la formation de type DBR) dans lequel les enseignants sont placés au sommet qui désigne habituellement les élèves, parce qu'ils sont les « formés », et un autre triangle (triangle de l'enseignement en salle de classe) dans lequel ils sont placés au sommet qui désigne habituellement les enseignants, puisqu'ils jouent alors leur rôle normal d'enseignants.

En contexte de formation, les sommets du triangle didactique sont : le formateur (étudiante-chercheure), le formé (les enseignantes participantes) et le savoir à enseigner (le concept de mole). Le rapport du formateur au savoir enseigné détermine les objectifs de la formation didactique : expliciter l'évolution socio-historique du concept, réduire les écarts entre le savoir savant et le savoir à enseigner et planifier des activités afin de développer des connaissances professionnelles des enseignants. Ces activités devraient permettre aux enseignants-formés de s'impliquer dans la formation, de leur faire prendre conscience des obstacles épistémologiques et didactiques relatifs à la mole, et de les orienter dans la construction de leurs propres activités d'enseignement et d'apprentissage. La formation se déroule dans un environnement d'accompagnement professionnel où chacun des acteurs (le formateur et le formé) s'engage dans le cheminement de l'autre : chacun pense ses hypothèses et les verbalise en engageant l'autre dans son action (Vial et Caparros-Mencacci, 2007). Pour ce faire, une reconnaissance des compétences de l'autre est essentielle et crée un climat de confiance. Ce climat positif favorise la créativité, l'autonomie et la responsabilité de chacun des acteurs (Vial et Caparros-Mencacci, 2007). Cet environnement d'accompagnement professionnel devrait permettre le développement des connaissances et des compétences professionnelles de l'enseignant. Il est souhaitable que l'enseignant développe une conscience disciplinaire positive et qu'il prenne conscience des conditions d'un enseignement efficace. La formation devrait l'outiller pour planifier et piloter un enseignement efficace.

Tel que proposé par Portugais (1995), en contexte de classe, les sommets du triangle didactique sont : l'élève, l'enseignant et le savoir à enseigner. Les deux triangles possèdent, comme sommet en commun, le savoir à enseigner. En formation, l'épistémologie du savoir est explicitée pour le rendre enseignable en contexte de classe. L'enseignant met en pratique les

acquis de la formation pour réussir sa transposition didactique interne. Le modèle pédagogique développé en formation aide l'enseignant à construire et gérer des activités constructivistes et à maintenir la dévolution des élèves. On s'attend à ce que les élèves développent des démarches didactiques efficaces en s'appropriant le savoir et en développant des modèles de raisonnement efficaces où tous les concepts sont construits et inter-reliés.

Dans la présente recherche, le concept de mole a été choisi parmi plusieurs autres concepts de chimie parce que sa transposition didactique comporte souvent de nombreuses lacunes et ne considère généralement pas, par exemple, son volet épistémologique, son volet didactique et le volet cognitif de l'élève. L'efficacité de l'enseignement de ce concept dépend de plusieurs facteurs : le temps qui lui est consacré, le développement cognitif de l'élève et la mise en pratique de la relation du triplet. La construction d'une séance d'enseignement, durant une formation didactique favorisant la collaboration des enseignants, pourrait être efficace pour anticiper les obstacles didactiques et contrecarrer les difficultés mathématiques.

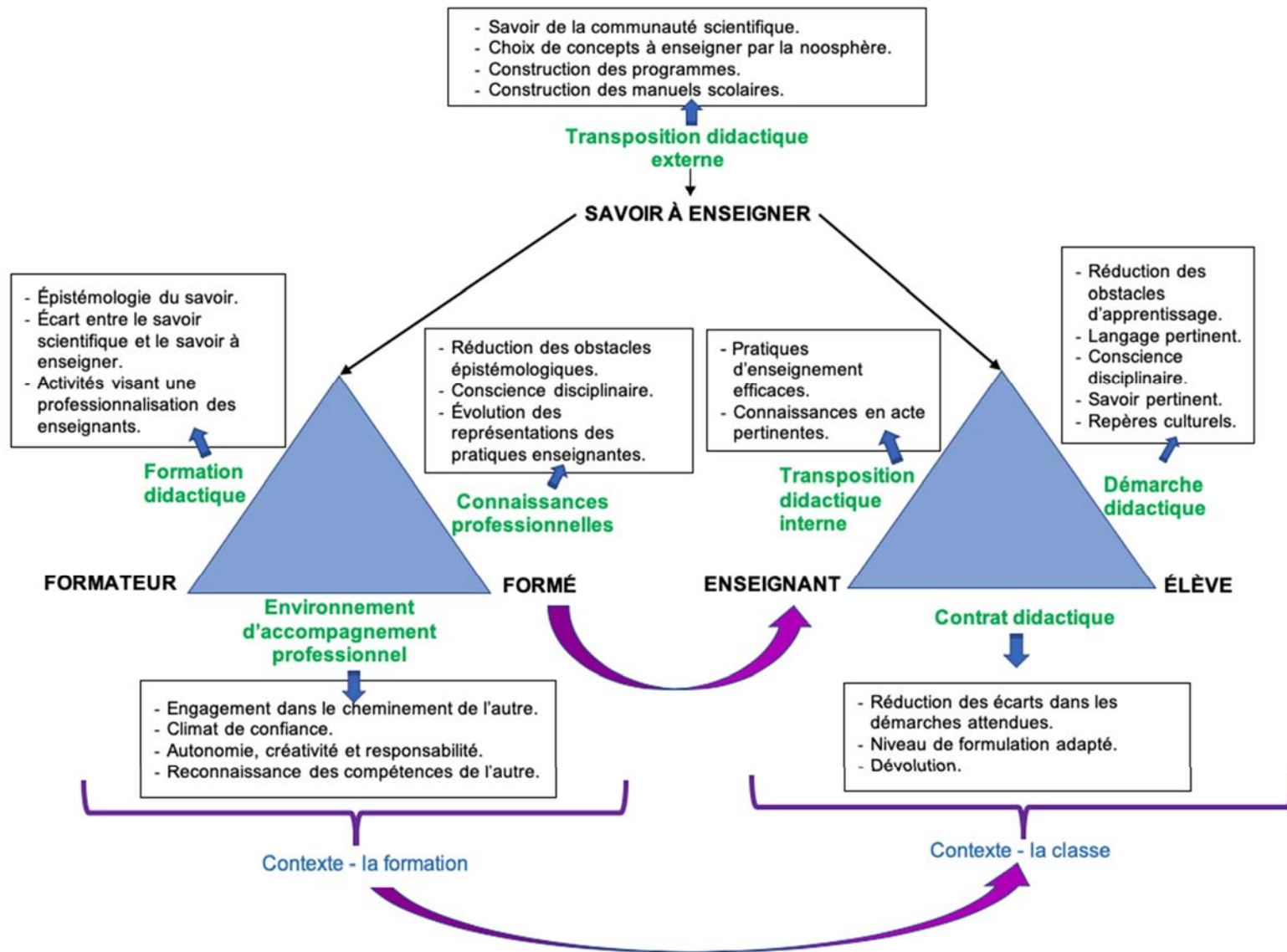


Figure 7 : Le modèle de la formation adoptée au cours du cycle DBR

2.5 Les objectifs spécifiques de la recherche

On rappellera que l'objectif général de la présente recherche était d'étudier l'impact d'une formation, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur l'évolution de leur connaissances et compétences professionnelles en enseignement de la chimie et plus particulièrement en enseignement du concept de mole.

Pour atteindre cet objectif, les objectifs spécifiques suivants ont été formulés :

- 1- Identifier les effets du dispositif de formation installé, basé sur le *Design Based Research*¹¹ sur l'évolution des connaissances professionnelles des enseignants.
- 2- Déterminer les effets de la formation sur l'amélioration de l'enseignement du concept de mole.
- 3- Identifier les moyens mobilisés par la séquence construite qui favorisent l'évitement des obstacles didactiques.

La méthodologie de recherche adoptée visait, d'une part, une collaboration entre les enseignants participants et la chercheuse pour favoriser un processus de développement professionnel et, d'autre part, une anticipation des obstacles didactiques, chez les élèves, relatifs au concept de mole. Cette méthodologie est présentée dans le prochain chapitre.

¹¹ Le *Design Based Research* est présenté dans le chapitre 3 « Méthodologie »

3 Méthodologie

Une recherche qui vise à développer une formation est une recherche de développement. Plusieurs auteurs ont proposé des modèles de recherche de développement. L'ingénierie didactique (Artigue, 2002 et Brousseau, 2013) et le *Design Based Research* (Steinberg et al., 2014) sont deux modèles souvent appliqués en didactique.

Réussir à rapprocher la communauté des chercheurs en sciences de l'éducation et celle des enseignants pourrait contribuer à l'amélioration de la qualité des recherches ainsi que de la qualité du développement professionnel des enseignants. Pour cette raison, la présente recherche comporte une méthodologie basée sur le *Design Based Research* (DBR) car cette méthode, qui s'applique bien à la didactique critique et prospective, permet une collaboration entre les deux communautés (Mckenney et Reeves, 2012).

Cette méthode de recherche, ancrée dans les problèmes d'éducation de la vie quotidienne et favorisant l'échange de connaissances entre les acteurs, vise à la fois le développement de théories et de pratiques. Elle est caractérisée par sa validité écologique, du fait de sa proximité avec l'environnement réel de la recherche, et sa validité externe, puisque ses résultats sont, du moins en partie (selon la nature et la taille des échantillons d'enseignants et d'élèves), généralisables (Mckenney et Reeves, 2012).

3.1 Définition du *Design Research*

Le *Design Research* est la catégorie générale de méthodes de recherche dont fait partie le *Design Based Research*. Toutes les recherches de type *Design Research* visent le développement de pratiques ou de matériel innovants qui présentent le maximum d'effets désirables et le minimum d'effets indésirables, ce qui exige une compréhension approfondie des différents éléments d'un système et de leurs interactions (O'Neill, 2012, p. 120).

Le *National Research Council* (NRC, 2002) attire l'attention sur le fait que la plupart des recherches classiques, en sciences de l'éducation, visent à décrire un phénomène, à en rechercher des causes ou à préciser un processus ou un mécanisme. Le *Design Research* vise

plutôt à répondre à des questions de type : Quand ? Comment ? Pour qui ? (Fishman, Pennuel, Allen, Haugen Cheng et Sabelli, 2013).

En didactique des sciences, le *Design Research* s'intéresse aux ingénieries de l'environnement et des situations qui s'avèrent les plus aptes à favoriser un apprentissage efficace (Kelly, Baek, Lesh et Bannan-Ritland, 2008). Le *Design Research* crée une dynamique qui vise à innover en s'adaptant aux besoins du terrain (Kelly et al., 2008 ; Bell, 2010). Ce genre de recherche, qui articule théorie et pratique, peut se baser sur une ou plusieurs théories ainsi que sur des résultats du terrain pour vérifier le fonctionnement des modèles proposés. Elle s'effectue selon les phases énumérées par l'acronyme ADDIE : *Analysis, Design, Development, Implementation* et *Evaluation*. En d'autres termes, ce type de recherche consiste à proposer un modèle, à construire le matériel didactique qui en découle, puis à évaluer le modèle et le matériel (Kelly, et al., 2008). L'efficacité de ces recherches se constate par l'évolution des pratiques professionnelles et par l'amélioration des apprentissages des élèves (Finbarr et Kelly, 2008).

Le *Design Research* allie recherche, savoir disciplinaire, expérience et créativité pour atteindre ses objectifs. Il s'appuie sur des hypothèses qui se veulent réalisables et qui sont validées, raffinées, corroborées ou réfutées en cours de recherche. Les chercheurs déterminent les objectifs et les processus d'une innovation mais n'ont pas nécessairement une idée claire de ce qui les attend comme résultats sur le terrain (Mckenney et Reeves, 2012). Alors que les chercheurs s'intéressent à développer de nouveaux instruments et à les évaluer en se basant sur des recherches antérieures, les acteurs du terrain mettent en pratique ces instruments et les évaluent. Les deux processus sont simultanés et interactifs. Chercheurs et acteurs du terrain en sortent gagnants puisque le processus mène à des connaissances professionnelles répertoriées pour les premiers et adaptées pour les deuxièmes. Ces processus sont illustrés à la figure 8.

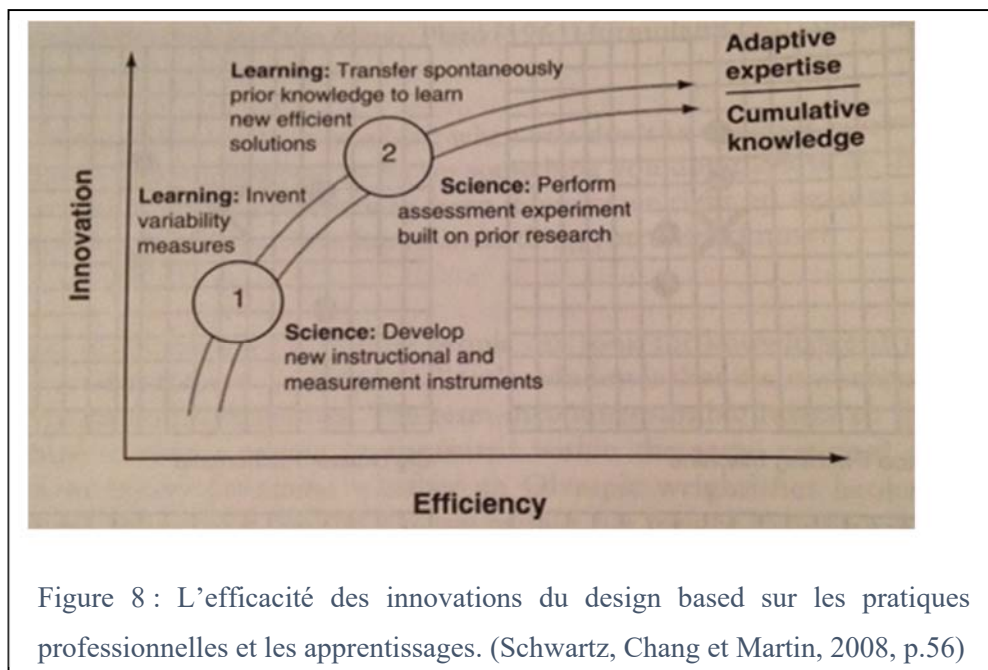


Figure 8 : L'efficacité des innovations du design based sur les pratiques professionnelles et les apprentissages. (Schwartz, Chang et Martin, 2008, p.56)

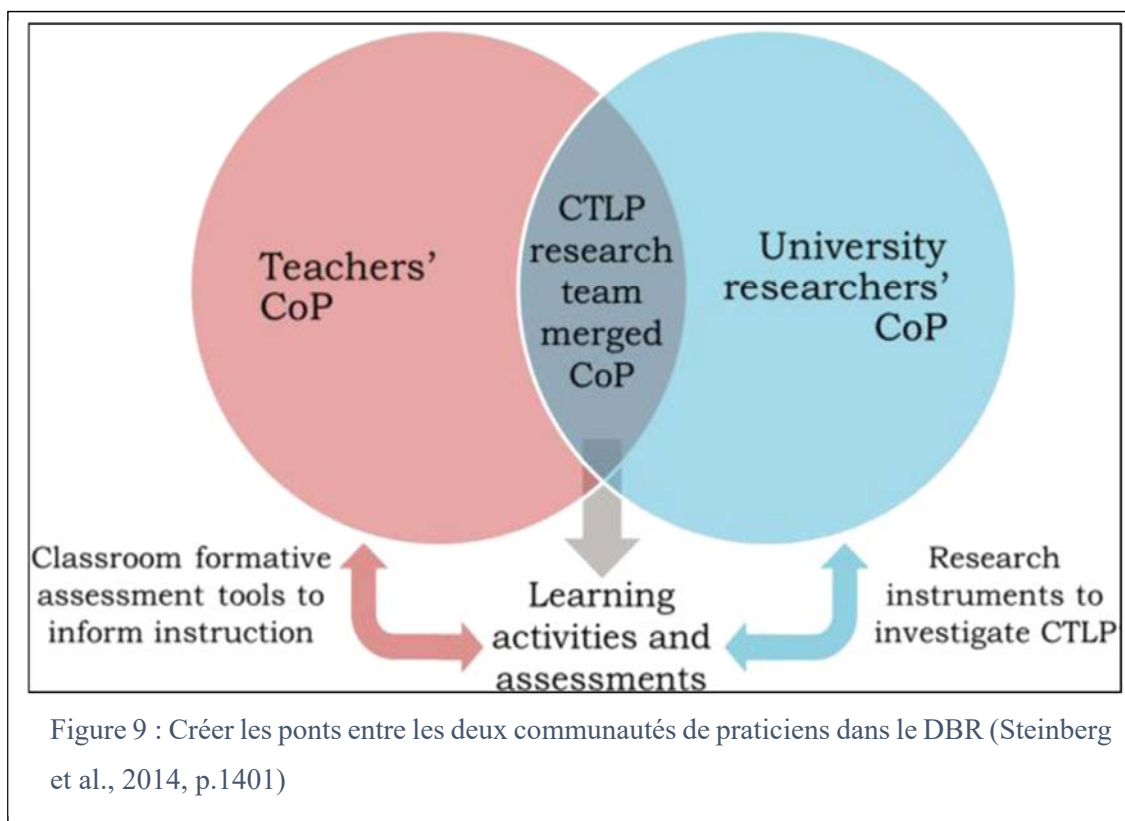
Le *Design Research* vise la production d'un matériel didactique qui témoigne d'un processus professionnel évolutif dont la finalité est la conception d'un environnement d'apprentissage qui rend l'élève plus productif (Fishman, et al., 2013, p. 137). Parmi les recherches de type *Design Research*, les recherches de type *Design Based Research* (DBR¹²) se distinguent par le fait qu'elles relèvent, en plus, le défi d'étudier en milieu naturel (l'environnement de la classe) les effets des innovations sur les apprentissages des élèves (Kali, 2008).

3.2 Le *Design Based Research*

Le *Design Based Research*, comme toutes les méthodes du *Design Research*, est une résultante de l'interaction entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée. La recherche fondamentale suit une démarche selon un cycle empirique comportant : l'observation pour recueillir des données, l'induction d'une hypothèse, la déduction ou la prédiction de résultats, les tests et l'évaluation pour relier les résultats aux hypothèses. La démarche de la recherche appliquée est un cycle constitué des étapes suivantes : l'identification du problème, le diagnostic, la planification des actions et l'évaluation (Mckenney et Reeves, 2012).

¹² Dans ce chapitre, l'acronyme DBR est utilisé pour désigner le *Design Based Research*.

Steinberg et al. (2014) expliquent que le DBR est une méthode de recherche de développement qui comporte des contributions de deux communautés de praticiens (CoP), les chercheurs et les enseignants, qui agissent comme deux systèmes interdépendants. La figure 9, ci-dessous, illustre comment cette méthode de recherche peut créer un pont entre les recherches en didactique et les pratiques professionnelles en classe (Steinberg et al. 2014). En chimie, les deux communautés de praticiens forment le CTLP (*Chemical Thinking Learning Progression*).



Cette complémentarité entre théorie et pratique favorise la mise en œuvre de réformes qui font évoluer l'enseignement et l'apprentissage. Le chercheur contribue surtout aux théories alors que l'enseignant contribue principalement aux données et aux besoins du terrain ; les deux communautés coopèrent et collaborent pour définir le nouveau matériel didactique, le concevoir, le tester dans son environnement et l'évaluer pour l'améliorer. L'enseignant s'engage dans un processus de développement professionnel et s'investit dans les résultats de la recherche

auxquels il a contribué pour développer et soutenir un environnement d'apprentissage efficace (*The Design Based Research Collective*, 2003, p. 5).

Ainsi, le DBR peut s'inscrire dans le processus du développement professionnel de l'enseignant, d'autant plus que le déroulement de ce type de recherche n'est pas linéaire, mais présente des retours et des démarches réflexives, de la part de tous les acteurs, sur la conception du matériel et sur l'action.

3.3 Les caractéristiques d'une recherche de type DBR

Le DBR est une méthode de recherche interventionniste puisqu'elle vise un changement réel sur le terrain. En fait, le problème ancré dans le terrain est identifié, analysé pour en repérer les causes, et traité sous des points de vue théoriques, scientifiques et pratiques.

Dans ce type de recherche, les théories choisies servent à concevoir des situations d'enseignement-apprentissage authentiques, qui visent des problèmes d'apprentissage ciblés, et l'interprétation des résultats est soutenue par une documentation sur les processus. Le DBR cherche donc à 1) explorer de nouveaux environnements favorables à l'enseignement et l'apprentissage ; 2) développer des théories de méthodes d'enseignement et d'apprentissage contextualisées ; 3) construire des connaissances ; 4) innover (*The Design Based Research Collective*, 2003, p. 8). Ces finalités se réalisent simultanément avec le développement du savoir professionnel des enseignants relatif au matériel didactique construit ; on entend par savoir professionnel l'ensemble de savoirs disciplinaires et de savoirs-agir en situation d'enseignement et d'apprentissage (*The Design Based Research Collective*, 2003). Anderson et Shattuck (2012) soulignent que le DBR permet de structurer les apprentissages, développer du matériel didactique, présenter des domaines du savoir et contextualiser ce savoir.

Mckenney et Reeves (2012) résument les caractéristiques du DBR : Il s'agit d'une méthode de recherche qui est à la fois théorique et pragmatique, collaborative, contextuelle, orientée vers une fin précise, ancrée dans le terrain et transformative.

Comme dans toute méthode de recherche de type *Design Research*, la théorie encadre toutes les étapes de la recherche et vise particulièrement à faire évoluer le modèle de formation

en tenant compte des pratiques. L'évaluation permet de valider, d'améliorer et de réfuter des hypothèses.

Dans cette méthode de recherche, la collaboration entre chercheurs et enseignants est une particularité fondamentale. Cette collaboration place les acteurs au même niveau puisque les connaissances théoriques des chercheurs et les connaissances pratiques des enseignants interagissent de la façon la plus cohérente possible. À noter que les praticiens du milieu scolaire ne sont pas toujours des enseignants et peuvent être d'autres acteurs du terrain tels que des conseillers pédagogiques, des directeurs d'établissement ou des techniciens de laboratoire. Toutefois, la nature de la coopération est anticipée en précisant, dès le départ, le rôle de chacun des acteurs.

La complexité du terrain, associé à un cadre théorique et scientifique, forme une sorte de catalyseur qui fait avancer le projet pour construire un principe d'intervention.

3.3.1 Une contribution à des principes.

Les méthodes de recherche de type *Design Research* contribuent à établir des principes qui permettent à leur tour d'énoncer des théories prescriptives-normatives en éducation. Ces théories facilitent la compréhension de divers phénomènes en identifiant leurs causes et leurs effets ; elles permettent ainsi d'identifier des problèmes et d'articuler des plans d'action et des décisions à prendre (Mckenney et Reeves, 2012).

D'après Merrill (2007, p. 63), les recherches de type *Design Research* visent à promouvoir l'apprentissage par des méthodes telles que : proposer aux élèves des problèmes ancrés dans la vie réelle ; mobiliser des connaissances déjà bien acquises ; privilégier les manipulations et les applications.

Pour qu'une recherche puisse contribuer à établir des principes, elle doit : 1) définir les buts ou les finalités dans un contexte déterminé ; 2) identifier comment les caractéristiques de l'intervention se concrétisent à travers des procédures ; 3) déterminer les arguments empiriques et les arguments théoriques qui soutiennent cette intervention (Akker, 1999/2010 cité par Mckenney et Reeves, 2012). Dans le cas de la présente recherche, les finalités consistent à construire une séance d'enseignement et d'apprentissage du concept de mole, au secondaire, qui permette la réduction des obstacles didactiques chez les élèves. Les caractéristiques de

l'intervention et des procédures seront conformes aux critères d'une intervention en DBR définis plus loin.

Les types d'interventions dans une recherche de type DBR sont divers : création de matériel didactique, détermination de méthodes de travail, construction de programme, etc. Une recherche ne porte habituellement que sur un seul type d'intervention, mais peut avoir un impact sur d'autres types. Ces types d'intervention se situent dans des champs comme le curriculum, les médias et les technologies, les apprentissages ou le développement professionnel (Mckenney et Reeves, 2012).

Le DBR est une méthodologie de recherche relativement récente. Certains des résultats que le DBR a permis d'obtenir sont maintenant répertoriés dans une base de données explicitée ci-après.

3.3.2 La base de données du DBR

Pendant les premières années, le matériel didactique créé dans le cadre de recherches de type *Design Research* et *Design Based Research* n'était pas répertorié. Mais étant donné la réussite des innovations produites et l'intérêt de les faire connaître, une base de données regroupant les innovations découlant du DBR a été créée. Cette base de données est accessible sur <http://design-principles.org> et s'enrichit progressivement des résultats de nouvelles recherches (Kali, 2008).

Les catégories de cette base de données permettent de baliser le DBR en quelques étapes générales : analyse de la situation ; adaptation du matériel (s'il est disponible) ou création du matériel (s'il n'est pas disponible) en fonction des objectifs de la recherche ; utilisation et évaluation du matériel ; révision du matériel (Kali, 2008).

Cette base de données permet de constater que le matériel didactique créé et adapté pour un contexte peut parfois être adapté à d'autres contextes, ce qui rend les résultats du DBR généralisables.

La création de cette base de données est importante puisque sa consultation pourrait augmenter la fiabilité du *Design Based Research*. En effet la consultation d'une base de données permet de prendre des décisions concernant le processus, l'analyse et les solutions, de planifier des interventions en se basant sur d'autres recherches et de communiquer les réussites et les

échecs, ce qui peut favoriser un meilleur développement professionnel (Mckenney et Reeves, 2012).

Les contributions pratiques du DBR consistent à résoudre un problème, installer un dispositif et provoquer un développement professionnel.

3.3.3 Le développement professionnel des enseignants

Dans une recherche de type DBR, la méthode collaborative permet non seulement des interactions entre le chercheur et les enseignants, mais également des interactions entre les enseignants. Ainsi, la production du matériel didactique s'effectue dans un contexte qui comporte de la conception, de l'expérimentation et de l'évaluation et qui contribue à développer la pensée réflexive chez tous les acteurs concernés.

Dans certains cas, les échanges interpersonnels et interactifs peuvent déclencher des conflits cognitifs et sociocognitifs chez les enseignants et entraîner une remise en question et un changement conceptuel de leurs pratiques professionnelles, ce qui est la finalité d'une démarche de développement professionnel (Bannan-Ritland et Baek, 2008).

Dans bien des cas, le développement professionnel produit par le DBR est une réponse à des besoins professionnels des enseignants. Par exemple, des enseignants peuvent se retrouver dans une situation empirique leur imposant de déployer des compétences de haut niveau et ressentir le besoin de se perfectionner. Dans le déroulement d'une recherche de type DBR, les enseignants s'engagent dans des activités significatives et se sentent soutenus par un chercheur (ou des chercheurs) qui leur permet de s'approprier des connaissances et des compétences professionnelles. De plus, l'équipe chercheurs-enseignants vise un objectif commun qui favorise de meilleurs apprentissages, et l'échange au sein de cette équipe augmente l'estime de soi des enseignants. Enfin, le DBR contribue à une amélioration des pratiques des enseignants en permettant des innovations concrètes (Bannan-Ritland et Baek, 2008).

Le cinq facteurs qui contribuent à une innovation sont : la connaissance des fonctions de l'innovation, la prise de conscience de l'intérêt de l'innovation, la décision d'innover, la mise en œuvre de l'innovation et la confirmation de la valeur de l'innovation au moment de son évaluation. Or ces facteurs coïncident avec les phases du DBR ; l'enseignant s'engage dans toutes les étapes de la recherche et participe à toutes les décisions. Cet engagement dans le

processus confirme la valeur des innovations aux yeux de l'enseignant et facilite son développement professionnel (Bannan-Ritland et Baek, 2008).

Le DBR est une recherche collaborative où chercheur et praticiens partagent et confrontent leurs expertises tant théoriques que pratiques pour développer les pratiques, innover le matériel didactique et produire des théories d'enseignement et d'apprentissage contextualisées. Un DBR pourrait contribuer à constituer ou à consolider des communautés de pratique. Ces communautés de pratique fondées sur le principe de collaboration entre les enseignants et des chercheurs (Wenger, 1998) s'appuient sur « la croyance que la production de connaissances améliore la pratique et que la pratique éclaire la production des connaissances » (Desgagné, 1997, p.377). Les communautés de pratique évoluent dans un environnement d'accompagnement professionnel où chaque acteur reconnaît l'autre et s'engage dans le cheminement de l'autre (Couture, Aurousseau, Levesque et Tremblay, 2017). Alors que les communautés de pratique n'ont pas la contrainte de contribuer à un principe comme dans le cas du DBR, elles offrent un environnement propice pour consolider le pont entre la communauté des praticiens et celles des chercheurs.

Le développement professionnel est l'une des contributions du DBR. Ce développement est une résultante d'un cycle de vie dont les phases sont explicitées ci-après.

3.4 Les phases du DBR

Dans le DBR, la motivation des chercheurs et des enseignants est souvent plus grande que dans le cadre d'autres types de recherche puisque l'évolution des pratiques et le développement professionnel qui découlent de la démarche réflexive motivent les enseignants, tandis que les chercheurs sont encouragés par la pertinence à la fois scientifique et sociale des résultats de leur recherche. La DBR arrive à créer le pont entre la théorie et les besoins du terrain (Bell, 2010, p. 244 ; Steinberg et al., 2014, p. 1401). Ainsi, les résultats du DBR sont communiqués à travers les pratiques, et le matériel didactique est adapté à un environnement d'apprentissage contextualisé. Ces points distinguent le DBR des autres types de *Design Research* et de plusieurs autres types de recherche (Bell, 2010, p. 245 ; *The Design Based Research Collective*, 2003, p. 5).

Le DBR peut être représenté par un cycle (Ejersbo et al., 2013 ; *The Design Based Research Collective*, 2003 ; Steinberg et al., 2014). Ce cycle est modélisé dans la figure 10. Il explique l'évolution continue des dispositifs, qui peuvent passer par plusieurs cycles, et montre une interaction sans hiérarchisation entre la théorie des chercheurs et les pratiques des enseignants. Il met en relief une évolution des méthodes traditionnelles visant à concevoir et à perfectionner du matériel didactique (Anderson et Shattuck, 2012). En fait, le DBR entrelace les théories et l'environnement d'enseignement-apprentissage, en proposant des actions et des méthodes planifiées de façon rigoureuse, qui permettent le plus de collaboration et de productivité que possible (Steinberg et al., 2014, p. 1402).

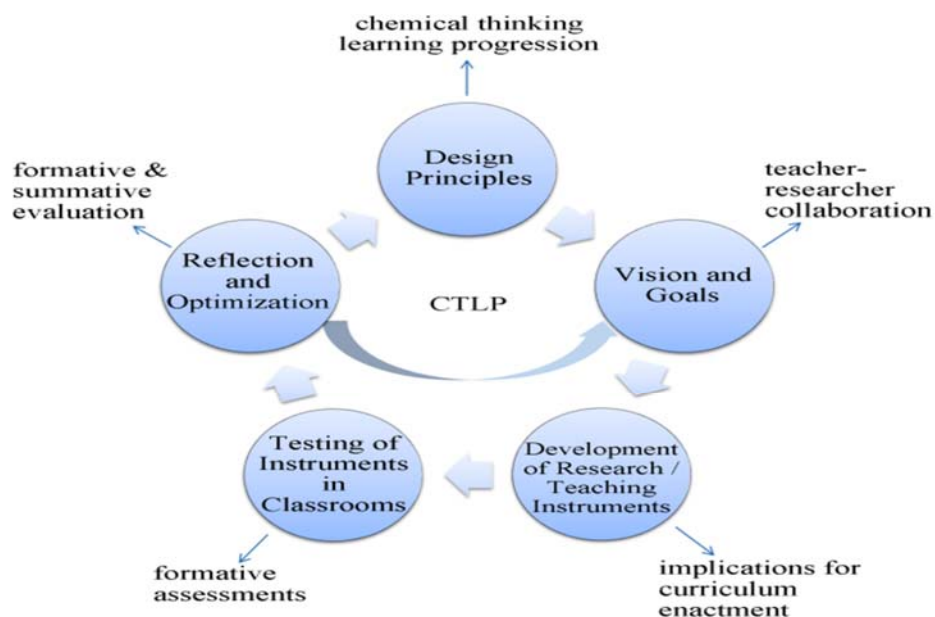


Figure 10 : Le cycle de vie de la DBR (Steinberg et al., 2014, p.1402)

Un modèle générique du DBR (figure 11) peut être déduit de ce cycle. Il comporte trois phases qui peuvent se répéter : analyse et exploration ; design et conception ; évaluation et réflexion (Mckenny et Reeves, 2012). La durée des phases n'est pas nécessairement la même ; elle dépend des résultats des analyses des données recueillies à la fin de chaque cycle, et des améliorations à apporter par la suite.

Le processus n'est pas linéaire (Figure 11) puisque Mckenny et Reeves (2012) identifient des microcycles (exemple : analyse et exploration) et des mésocycles (exemple :

design et construction + évaluation et réflexion) de nature empirique. L'ensemble constitue un macrocycle ou le cycle complet de DBR de nature empirique et théorique.

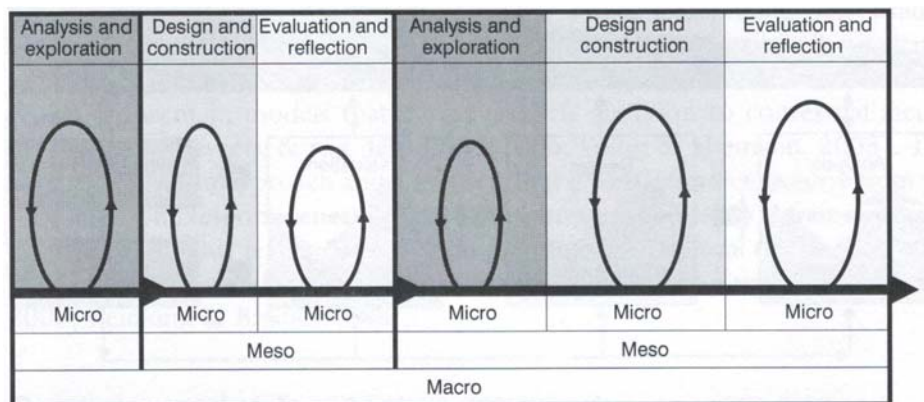


Figure 11 : Micro, méso et macro cycles (Mckenney et Reeves, 2012, p. 78)

Mckenney et Reeves (2012), expliquent plus en détail chacune des trois grandes phases de leur modèle :

Phase de l'analyse et de l'exploration

Le DBR commence par un microcycle d'analyse et d'exploration : une recension des écrits permet de s'assurer que le problème est pertinent, que le DBR pourrait contribuer à le résoudre et que la recherche pourra apporter une contribution aux connaissances scientifiques dans le domaine. Cette investigation préliminaire contribue à définir le problème, établir ses causes, explorer le contexte et identifier les besoins et les attentes. Le problème décrit l'écart entre la situation actuelle et la situation désirée. Les solutions à ce problème sont les interventions visant à le résoudre. L'essentiel est de découvrir un recoupement entre les intérêts des chercheurs et les intérêts des enseignants. Devant divers problèmes possibles, l'importance de ce recoupement peut d'ailleurs être un critère permettant à l'équipe chercheurs-enseignants de choisir celui qui leur semble prioritaire.

L'analyse des causes et des composantes ainsi qu'une identification des interactions des composantes permet de raffiner le problème. L'analyse vise alors à : faire un portrait de la situation et l'expliquer ; définir le problème ; distinguer entre les éléments potentiellement modifiables et ceux qui ne le sont pas.

Cette première phase est déterminante pour préciser les stratégies, élaborer des plans d'action, engager des participants, créer des instruments et recueillir certaines données.

D'autres microcycles d'analyse et d'exploration ont lieu au début d'un mésocycle afin de régulariser les démarches. L'analyse des résultats du mésocycle précédent et l'exploration de nouveaux besoins du terrain permettent de faire évoluer le produit jusqu'à ce qu'il réponde aux attentes du cycle de DBR.

Les finalités des microcycles d'analyse et d'exploration déclenchant un mésocycle sont moins exigeantes que celles du premier microcycle. C'est pour cela que dans la modélisation de la figure 11, le premier microcycle d'évaluation et d'exploration est plus grand que celui qui déclenche un mésocycle.

Phase de design (de la conception du matériel didactique)

Cette deuxième phase, qui demande le plus de créativité de la part de l'équipe, consiste à explorer une panoplie de solutions, à choisir et à planifier des solutions, et à les concevoir. Deux sortes de design sont élaborés : le *Design Requirement* et les *Design Propositions*. Le *Design Requirement* spécifie les points saillants des modifications souhaitées dans le contexte de la recherche. Les *Design Propositions* décrivent le processus de la réalisation de ces modifications en se basant sur la théorie, les recherches empiriques et l'expertise locale et spécifient les caractéristiques du modèle (le pourquoi et le comment). Évidemment, à mesure que la recherche progresse, les *Design Propositions* sont plus susceptibles de changer que le *Design Requirement* car ces propositions sont constamment réfutées ou raffinées selon les besoins du terrain.

Le succès de la deuxième phase est fonction de la qualité du travail d'équipe, de la communication entre les membres de l'équipe et de leur créativité. En ce qui concerne le travail d'équipe, la formation d'un groupe relativement hétérogène peut être enrichissante du fait que plusieurs points de vue sont échangés. En ce qui concerne la communication, les membres de l'équipe doivent partager un langage commun qui permet des échanges clairs et précis. En ce qui concerne la créativité, il est essentiel que les membres de l'équipe se respectent mutuellement, ce qui leur permet de s'exprimer sans contraintes et d'accepter les critiques constructives.

Une exploration des solutions consiste à recueillir les idées, mener une critique des solutions proposées et vérifier la viabilité des idées vis-à-vis des objectifs établis. Durant cette phase, une triangulation entre les *Design Propositions*, les résultats préliminaires et la littérature scientifique rend le processus plus efficace. Un squelette de design est ainsi construit ; il comprend les moyens, le matériel, les autres ressources, les activités, les procédures de mise en œuvre, la population, le temps et le budget. Un prototype de l'intervention peut être mis à l'essai. L'étude du prototype peut susciter des questions au sujet de la littérature scientifique, du *Design Requirement* ou des *Design Propositions* et lancer ainsi un nouveau cycle visant à améliorer le prototype avant de poursuivre.

Le premier microcycle de conception est généralement moins long que les autres microcycles de conception réalisés plus tard au cours du DBR. En fait, plus le DBR avance et plus l'appropriation des besoins du terrain devrait permettre des améliorations pertinentes et exhaustives.

Phase de l'évaluation et de la réflexion

Dans cette phase, le mot « évaluation » désigne toute mise à l'essai (ou tout « test ») d'une intervention conçue ou construite. Durant l'évaluation, les idées du design et les prototypes de solution sont mis à l'essai (ou « testés ») d'une façon empirique. Les résultats, analysés selon les objectifs, permettent de raffiner le modèle, de comprendre le comment et le pourquoi, de déterminer l'appropriation des intentions de l'intervention et de faire un retour sur les *Design Propositions*. De façon plus précise, on peut distinguer neuf étapes de l'évaluation : identifier l'objectif ; préparer des questions guidées ; sélectionner des stratégies ; déterminer des méthodes spécifiques ; faire un brouillon et réviser le plan ; créer ou chercher des instruments ; recueillir des données ; analyser les données ; écrire un rapport.

On peut distinguer trois types d'évaluation : le test alpha, le test bêta et le test gamma. Ils permettent d'évaluer, successivement, 1) l'analyse et l'exploration ; 2) le design et la construction et 3) les impacts.

Le test alpha évalue la structure interne de l'intervention pour en déduire la faisabilité. Durant ce test, on cherche à répondre aux questions : À quel point la littérature consolide-t-elle et justifie-t-elle les idées du design ? Comment le design incarne-t-il les *Design Propositions* ? Quels changements seraient nécessaires pour augmenter la plausibilité et l'atteinte des

objectifs ? Pour ce test, les instruments d'évaluation peuvent être : le groupe de discussion, les questionnaires, la liste de contrôle, les entretiens. Une intervention d'un expert externe est parfois recommandée pour ouvrir des perspectives nouvelles et valider les approches.

Le test bêta s'intéresse à la viabilité de l'intervention dans son contexte. Quel est le niveau de perception des praticiens de la pertinence et de l'applicabilité de l'intervention ? En pratique, quelles sont les interventions qui correspondent au design et celles qui n'y correspondent pas ? Comment expliquer la résilience de certaines façons de faire ? Bien que l'entretien soit l'outil d'évaluation privilégié pour ce test, l'observation directe peut également être utile.

Le test gamma s'intéresse aux résultats de l'intervention. Quelle est l'efficacité de l'intervention et quelles en sont les conditions ? Quel est l'impact à long terme de l'intervention ? Dans une classe représentative du milieu scolaire, quelles sont les conditions qui favorisent le succès de l'intervention et quelles sont les conditions qui l'inhibent ? Pour ce test, les outils d'évaluation privilégiés sont les entretiens et les post-tests.

Ce microcycle d'évaluation et de réflexion amorce un nouveau mésocycle puisque les résultats de ces tests sont analysés au cours du microcycle d'analyse et d'exploration du mésocycle suivant.

3.5 Les critères de scientificité du DBR

Le système éducatif comporte de multiples facettes telles que les connaissances des élèves, l'expertise de l'enseignant, les activités d'apprentissage, le matériel didactique et les évaluations. Le fait que les recherches de type *Design Based Research* se déroulent sur le terrain, à l'intérieur d'établissements scolaires, améliore leur pertinence scientifique par rapport à celle de méthodes de recherche plus classiques. En effet, les résultats obtenus dans un laboratoire de recherche ne se vérifient pas toujours dans les classes, où les environnements d'apprentissage sont beaucoup plus complexes (Mckenney et Reeves, 2012).

Dans le processus interactif de va-et-vient entre la théorie et les pratiques qui caractérise le *Design Based Research*, le design évolue pour s'adapter aux exigences du terrain tout en respectant les fondements théoriques de la recherche. De plus, le rapprochement entre

chercheurs et enseignants, qui est à l'inverse de l'éloignement souvent reproché aux recherches en sciences de l'éducation, augmente la pertinence des pratiques qui découlent des recherches (Mckenney et Reeves, 2012).

L'interaction entre la théorie et le terrain informe et améliore les pratiques et l'apprentissage dans le contexte choisi pour la recherche. De même, la coopération chercheurs-enseignants et les évaluations continues permettent des triangulations qui assurent l'objectivité et la fiabilité des résultats de la recherche. En plus, la proximité du terrain et les évaluations continues permettent à la recherche d'atteindre une validité satisfaisante. Ainsi, fiabilité, validité et objectivité procurent à la DBR des critères de scientificité suffisants (*The Design Based Research Collective*, 2003, p. 8).

La réussite du DBR dépend de la mise en œuvre des savoirs retenus, du maintien d'une étroite collaboration chercheurs-enseignants et de la sauvegarde de l'authenticité de la démarche appliquée (*The Design Based Research Collective*, 2003, p. 8). L'auto-évaluation, qui est une technique utile dans le DBR, permet aux enseignants de constater et d'apprécier l'effet positif de l'évolution de leurs pratiques dans leur enseignement. Cette autoévaluation favorise par ailleurs la création d'une culture commune développée à partir de l'environnement DBR (Steinberg et al., 2014, p. 1406).

Le DBR comporte toutefois certains défis qui sont présentés dans la section suivante.

3.6 Les défis du DBR

O'Neill (2011) compare la conception du matériel didactique produit dans le cadre du DBR à celle d'un avion en aéronautique. Dans les deux cas, le prototype est soutenu par des théories ; la créativité des chercheurs ou des concepteurs doit se manifester ; les difficultés ouvrent à de nouvelles perspectives pour développer le produit et une ouverture aux idées d'autres concepteurs augmente la probabilité de réussite.

O'Neill relève aussi des points différents qui soulignent certaines limites du DBR : en aéronautique, les facteurs déterminant les caractéristiques du prototype sont des constantes physiques mesurables, mais en DBR, l'appropriation du savoir n'est pas mesurable de façon aussi directe ; en aéronautique, la conception peut se faire en partie par essais et erreurs (par

exemple avec des modèles réduits) alors qu'en éducation, cette approche pourrait causer du tort aux élèves dans leurs apprentissages ; en aéronautique, l'échec est vite annoncé par les ingénieurs car il peut servir de tremplin à d'importantes améliorations mais, en éducation, les chercheurs ont du mal à annoncer leur échec ; en aéronautique, il est possible d'essayer un prototype de façon virtuelle, ou de le faire essayer par des pilotes d'essai expérimentés et parés à toute éventualité, mais en éducation le risque de nuire à la qualité de l'apprentissage des élèves doit être évité.

Le DBR est une recherche qui implique conception, développement, exécution et évaluation. Dans ce processus, les chercheurs sont des acteurs, ils sont même le « meilleur outil de la recherche » (Anderson et Shattuck, 2012, p. 18). Mais, dans ce contexte, les chercheurs ne peuvent pas facilement faire une critique objective du matériel didactique créé ni du processus en général. De même, il n'est peut-être pas toujours réaliste de s'attendre à ce que les chercheurs aient développé toutes les compétences leur permettant de partager des concepts et des activités avec des enseignants, de garder l'enthousiasme suffisant pour motiver les collaborateurs et de toujours agir et intervenir efficacement.

Enfin, Bru (2002) signale une des limites importantes des recherches dans lesquelles une grande proximité entre enseignants et chercheurs est planifiée : la confusion des rôles. « Les objectifs des uns et des autres sont et restent différents : les enseignants travaillent sur leurs pratiques pour les faire évoluer alors que les chercheurs se consacrent (certes de façon non exclusive) à l'étude des processus d'évolution ». Quand l'investissement et la collaboration ne sont pas efficaces, une « passerelle » superficielle se crée : les chercheurs « investissent la sphère de l'action » et les enseignants deviennent des pseudo-chercheurs qui risquent d'oublier le problème initial.

3.7 Un rappel du modèle de la formation

Un retour sur le modèle, les caractéristiques et les finalités du DBR est essentiel avant d'en décrire le déroulement global.

Comme le montre la figure 7, la caractéristique principale de la recherche est l'homomorphisme. Les enseignantes ont vécu des situations similaires à celles qu'elles ont fait

vivre aux élèves. Elles se sont appropriées l'épistémologie du concept de mole et le langage approprié afin d'améliorer leur modèle mental au sujet du concept avant de faire construire leur propre modèle aux élèves. Le but est de développer chez l'élève le modèle A du raisonnement (Cormier, 2014) qui consiste à lui faire construire un concept correct et lui faire créer un réseau conceptuel pertinent lui permettant de répondre correctement à une question mettant en jeu le concept de mole.

La formation débuta par un rappel de concepts scientifiques tels que « mole », « masse », « volume », « unité de masse atomique », etc. Elle se poursuivit par la présentation de suggestions visant l'adoption, par les enseignants, d'un langage pertinent distinguant et reliant les domaines sous-microscopique et macroscopique et par des repères essentiels concernant l'épistémologie et l'évolution socio-historique du concept de mole. Les nombreux exercices proposés aux enseignantes visaient ensuite une automatiser des concepts scientifiques qui portent le plus à confusion. Elles ont développé des conceptions scientifiques du concept de mole et les activités proposées ont permis d'automatiser ces nouvelles conceptions. Notons que les modèles de coexistence des conceptions, notamment celui d'Ohlsson (2009) et celui de Potvin, Sauriol et Riopel (2015) furent retenus dans le cadre de cette recherche.

La planification de la formation s'est basée sur une analyse didactique du contenu (tableau 3) qui a permis de mieux tisser les liens entre les représentations des enseignants au sujet du concept de mole et les erreurs des élèves. Des résultats de recherches présentées dans le cadre théorique de la présente recherche confirment l'existence de ces liens. En conséquence, la formation s'est intéressée à l'évolution de l'épistémologie de l'enseignante. Les enseignantes se sont engagées dans un travail d'équipe et elles ont opéré une évolution de leur gestion didactique de la classe en partageant des connaissances professionnelles incluant les connaissances disciplinaires et les connaissances en acte.

En conclusion, la formation planifiée selon l'homomorphisme vise d'une part un volet théorique, comprenant l'épistémologie du concept de mole et le savoir à enseigner est développé et, d'autre part, un volet pratique comportant des connaissances en acte et un travail d'équipe est travaillé. Cette formation est conforme au modèle de reconstruction de l'enseignement proposé par Duit (2007).

3.8 Le déroulement global de la formation

La collecte de données de la présente recherche a eu lieu au Liban, à l'école Saint-Joseph des Filles de la Charité (ville de Zouk), dans six classes de niveau EB9 (niveau équivalent à la 4^e année du secondaire, au Québec) où est enseigné le concept de mole. Le choix de l'école était intentionnel et constituait un « échantillon de convenance ». En effet, l'étudiante-chercheuse a déjà occupé un poste de conseillère pédagogique en sciences, et plus particulièrement en chimie, pendant une dizaine d'années à cette école.

Le profil de chacune des enseignantes participantes est décrit dans le tableau 5. Pour garder l'anonymat des participantes, un pseudo-nom a été attribué à chacune.

Pseudo-nom de l'enseignante	Années d'expertise en enseignement	Années d'expertise en enseignement de la classe de EB9	Discipline scolaire enseignée	Discipline de spécialisation	Nombre d'élèves pris en charge
Joëlle	9	9	Les sciences (physique, chimie et biologie) et les mathématiques	Biologie	9
Marthe	8	3	La chimie	Chimie	35
Joanne	1	1	La chimie	Chimie	35
Élise	15	3	Les sciences	Sciences	12
Cynthia	2	1	La chimie et les mathématiques	Physique	32
Aya	2	1	Les sciences	Chimie	32

Tableau 5 : Le profil des enseignantes participantes

Tel que mentionné dans le cadre théorique, cette recherche visait la reconstruction de l'enseignement du concept de mole selon deux volets : 1) un volet disciplinaire, dans le cadre duquel le concept est explicité en se basant sur des résultats de recherche portant sur l'évolution socio-historique du concept et le langage scientifique adéquat à tenir; 2) un volet pratique, pour développer des compétences professionnelles comme le travail en équipe, les connaissances pratiques relatives à la conception et au pilotage d'une séquence et l'évaluation des

apprentissages. La caractéristique principale de cette formation est l'homomorphisme, dont le modèle a été présenté dans le cadre théorique (Figure 7).

Dans cadre de cette recherche, l'étudiante-chercheuse (la formatrice), a animé des activités didactiques visant le développement des connaissances professionnelles des enseignantes participantes (ou les formées). Sur le plan théorique, les enseignantes se sont appropriées l'épistémologie et l'évolution socio-historique du concept de mole et ont révisé les définitions adoptées. Sur le plan pratique, elles ont identifié les critères d'une analogie réussie et en ont construit une pour enseigner le concept de mole ; elles se sont familiarisées avec les erreurs sémantiques pour adopter un langage pertinent ; et elles ont construit des outils d'évaluation. Ces formations étaient réparties sur 5 méso cycles qui seront explicités dans les paragraphes suivants.

À noter que le contenu disciplinaire respectait le programme libanais. Selon le curriculum libanais (CNDP, 1997), le concept de la mole doit être enseigné en atteignant les objectifs spécifiques suivants :

- *Distinguer entre les termes « microscopique » et « macroscopique ».*
- *Définir la mole.*
- *Utiliser la mole comme unité de la quantité de la matière.*

Dans ce curriculum, deux activités sont conseillées aux enseignants :

- *Relier l'idée de mole au concept de douzaine pour s'assurer que les élèves ont compris la mole comme étant un nombre de particules bien déterminé.*
- *Aider les élèves à réaliser que la masse d'une mole varie d'une substance à une autre.*

Dans le cadre de cette recherche, les formations se sont limitées à l'atteinte des objectifs précisés ; toutefois, tenant compte de la littérature scientifique présentée dans le cadre théorique, l'analogie avec la douzaine, proposée dans ce programme, a été critiquée et améliorée.

3.9 Le déroulement du cycle DBR

Dans le cadre de la présente recherche, les phases du DBR décrites dans le cadre théoriques ont été suivies. Le macrocycle s'est étendu sur une année scolaire. Chacun des mésocycles a duré en moyenne trois semaines. Les durées sont précisées dans la figure 12.

Comme mentionné ci-dessus, le macrocycle a commencé par un mésocycle d'exploration et d'évaluation. Durant ce mésocycle, l'étudiante-chercheure a animé un groupe de discussion avec 10 enseignantes, elle a analysé les fiches de préparations des enseignantes participantes et elle a collaboré avec Marthe (une enseignante participante) pour élaborer un test diagnostique pour ses élèves de seconde qui formeront le groupe témoin. Après ce premier mésocycle, l'étudiante-chercheure et les enseignantes ont vécu trois mésocycles visant la construction et l'amélioration du matériel didactique. Durant chacun de ces trois mésocycles, l'étudiante-chercheure a animé une activité de perfectionnement avec les 6 enseignantes participantes puis elle les a guidées dans la construction ou l'amélioration du matériel didactique. À chaque mésocycle, deux enseignantes ont expérimenté la séquence dans leur classe et évaluent les apprentissages. Les deux enseignantes qui ont expérimenté, ont fait un retour sur le vécu de classe en partageant un retour réflexif sur leur pratique, en soulevant les points forts et les points faibles de la séquence, en présentant les résultats des évaluations des apprentissages et en partageant leur pratique et leur expérience avec les autres. Après ce partage, un nouveau mésocycle commence. Le macrocycle de DBR s'est terminé avec un mésocycle d'évaluation et de réflexion. Durant ce mésocycle, l'étudiante-chercheure a animé un groupe de discussion avec les enseignantes participantes et une entrevue individuelle avec chacune afin d'identifier l'impact de la formation sur le développement des compétences professionnelles des enseignantes et sur la réduction des obstacles didactiques chez les élèves.

Le macrocycle de DBR a comporté alors : 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. En tout, l'étudiante-chercheure a animé trois activités de perfectionnement (de trois heures chacune) réparties sur les trois mésocycles de construction et d'amélioration du matériel didactique. Le premier mésocycle a duré un mois, chacun des mésocycles de construction et d'amélioration du matériel didactique a duré trois semaines et le

dernier mésocycle a duré une journée. Le déroulement général de chacun des mésocycles est présenté ci-dessous.

3.9.1 Le mésocycle (1) : Analyse et exploration

Durant cette étape, la chercheuse a animé un groupe de discussion¹³, analysé¹⁴ des fiches de préparation des enseignantes participantes, et analysé¹⁵ des réponses écrites de 108 élèves ayant reçu un enseignement du concept de mole par l'une des enseignantes participantes. Les résultats de cette collecte de données, qui servait de test alpha, ont permis de valider la faisabilité de cette recherche telle que décrite dans les chapitres précédents. Les objectifs de cette phase étaient de : 1) déterminer le modèle pédagogique des enseignantes ; 2) identifier les difficultés d'enseignement vécues par les enseignantes et les solutions adoptées ; 3) vérifier l'existence d'obstacles didactiques relatifs au concept de mole chez les élèves.

3.9.2 Le mésocycle (2) : Conception de matériel didactique

Cette étape a commencé par le microcycle de conception de matériel didactique planifié selon les résultats de l'analyse du mésocycle (1). L'étudiante-chercheuse a animé une première activité de perfectionnement. Puis, elle a guidé les enseignantes dans la conception d'une séquence efficace d'enseignement du concept de la mole. Plus tard, les enseignantes ont réalisé elles-mêmes les solutions possibles aux activités proposées dans cette séquence ; elles ont ainsi vécu ce que les élèves allaient plus tard vivre dans leur classe. Par la suite, deux enseignantes, Élise et Joëlle, ont animé leur classe. Le mésocycle s'est terminé par un microcycle d'évaluation et de réflexion.

3.9.3 Le mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique

Les résultats des élèves et les partages entre les enseignantes à la fin du mésocycle précédent ont permis de définir les lacunes à combler dans la conception du matériel didactique et d'identifier des besoins des enseignants pour développer leur pratique enseignante. Après ce

¹³ Voir le « Guide de discussion du groupe de discussion (Phase d'exploration) » (Annexe 4).

¹⁴ Voir la « Grille d'analyse des fiches de préparation » (Annexe 5).

¹⁵ Voir le test « Évaluation diagnostique » (Annexe 6).

microcycle d'analyse et d'exploration un microcycle de conception de matériel didactique a été déclenché : l'étudiante-chercheure a animé une activité de perfectionnement répondant aux besoins des enseignantes. Les enseignantes ont ensuite amélioré la séquence d'enseignement. Après la formation, deux enseignantes, Cynthia et Aya, ont mis la séquence à l'essai et ont fait part de leur bilan réflexif et des résultats des évaluations des apprentissages des élèves. Comme le mésocycle (2), ce mésocycle s'est terminé par un microcycle d'évaluation et de réflexion.

3.9.4 Le mésocycle (4) : Suite de l'amélioration du matériel didactique

Ce mésocycle a comporté un microcycle d'analyse et d'exploration et un microcycle de conception de matériel didactique dont le déroulement était similaire à ceux du mésocycle (3). Durant ce mésocycle, Marthe et Joanne ont expérimenté la séquence d'enseignement.

3.9.5 Le mésocycle (5) : Impact de la formation

Ce mésocycle était formé d'un microcycle d'évaluation et de réflexion qui clôturait la formation et qui permettait de répondre à l'objectif général de la recherche. Durant ce mésocycle, une évaluation, ou test gamma, a été faite à partir de l'analyse d'un groupe de discussion¹⁶, d'entretiens d'explicitation¹⁷ et des résultats des élèves¹⁸..

À noter que les enseignantes ont elles-mêmes choisi celles qui expérimentent à chaque mésocycle. Leur choix était essentiellement basé sur leur planification qui n'était pas nécessairement la même.

Une explicitation de chacun des mésocycles fait l'objet du paragraphe 4.2 du chapitre suivant. En plus, l'annexe 9 présente une description détaillée de l'activité de perfectionnement et du matériel didactique créé durant chacun des mésocycles (2), (3) et (4).

La figure 12, donne un aperçu du déroulement global du macrocycle de DBR qui sera explicité dans le chapitre suivant.

¹⁶ Voir le « Guide de discussion du groupe de discussion (Phase d'évaluation et de réflexion) » (Annexe 10)

¹⁷ Voir le « Guide de l'entrevue individuelle » (Annexe 11).

¹⁸ Ces résultats sont présentés et analysés dans un paragraphe situé plus loin.

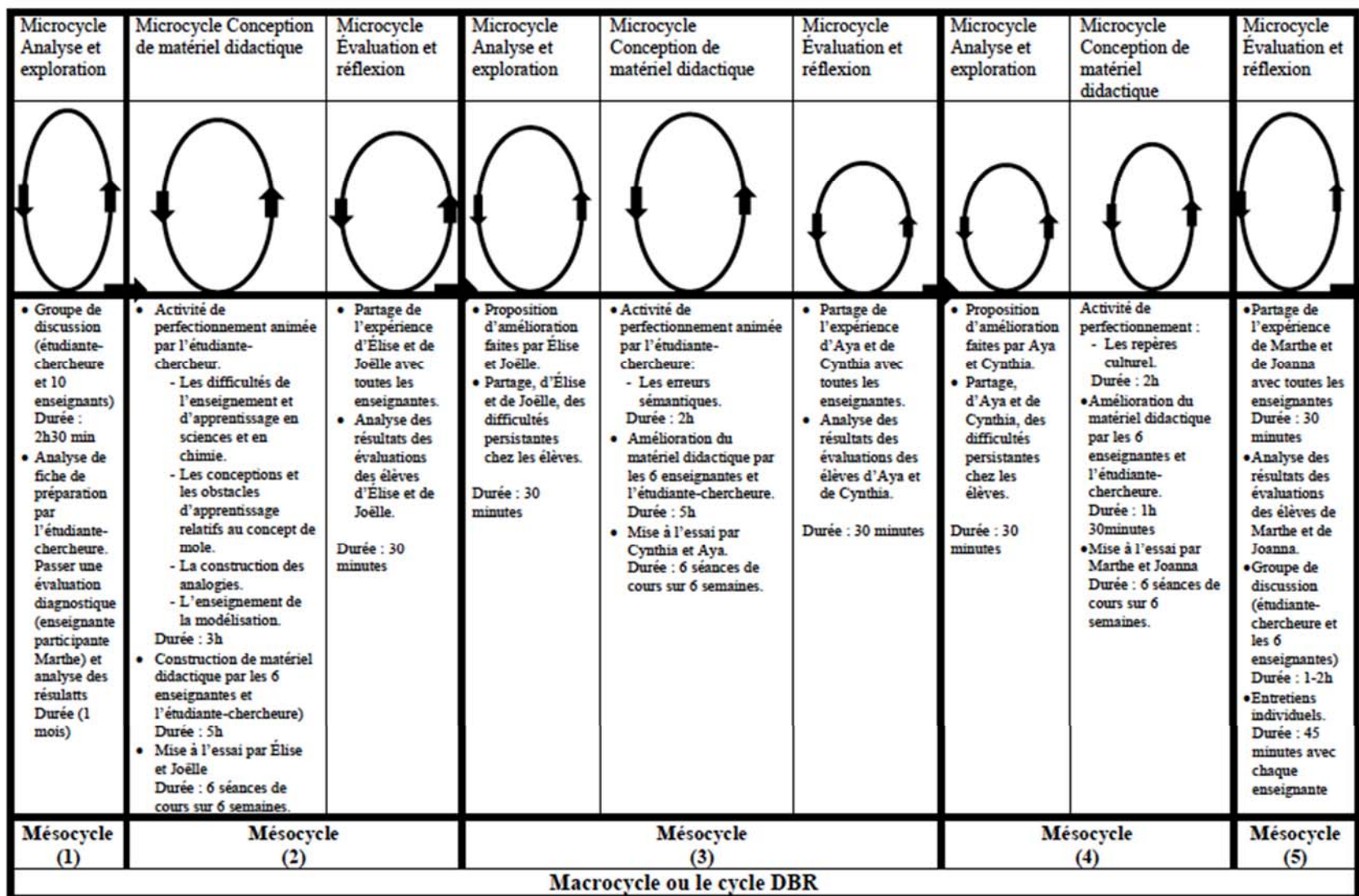


Figure 12 : La modélisation du macrocycle de DBR

3.10 Les outils de collecte des données

Cette section présente, de façon plus détaillée, les divers outils de collecte des données utilisés dans le cadre de la présente recherche. Il s'agit du groupe de discussion, du test, de l'entrevue individuelle, de l'analyse de documents et de l'observation directe. Une triangulation des résultats obtenus à l'aide de certains de ses outils permet de s'assurer de leur validité et de leur pertinence.

3.10.1 Le groupe de discussion

Le groupe de discussion est « une méthode qualitative de recherche sociale qui favorise l'émergence de toutes les opinions » (Spiral, 2016). C'est « une technique d'entrevue qui réunit de six à douze participants et un animateur, dans le cadre d'une discussion structurée, sur un sujet particulier » (Geoffrion, 2016, p. 402).

La discussion dans le groupe est ouverte et fournit des réponses à des questions de l'ordre du « pourquoi » et du « comment » (Spiral, 2016). Il s'agit de « scruter tous les angles possibles d'une cible précise » à travers des questions structurées (Gaudreau, 2011, p.139).

Les participants sont choisis selon des critères déterminés en fonction du problème soulevé. Ils sont sélectionnés à partir d'un échantillonnage ou en faisant appel à des volontaires (cas de la recherche présente) (Spiral, 2016). Le groupe peut être homogène ou hétérogène concernant des critères comme l'âge, l'expertise, les valeurs, l'emploi (Gaudreau, 2011). Autant que possible, les participants recrutés représentent une bonne diversité d'opinions et d'expériences. Certains types de participants pourraient nuire au déroulement d'un groupe de discussion comme : les personnes qui se connaissent, celles qui veulent plaire, celles qui ont tendance à jouer un rôle d'animateur et les animateurs professionnels (Geoffrion, 2016). Le nombre d'environ 6 à 12 participants favorise une dynamique de groupe qui incite les participants à approfondir, expliciter et justifier leurs avis respectifs (Geoffrion, 2016 ; Spiral, 2016).

L'animateur est muni d'un guide de discussion où sont indiqués les principaux thèmes à aborder selon un ordre provisoire et en estimant une durée pour chacun. Les thèmes retenus

dans le guide sont présentés au groupe sous forme de questions ouvertes organisées de la plus générale à la plus précise (Gaudreau, 2011). Les questions sont généralement plus nombreuses que celles d'une entrevue, et enrichissent la collecte de données (Gaudreau, 2011) en amenant les participants à faire part de leur expérience.

« L'animateur doit créer un environnement permissif et confortable, où des interdépendances se créent et où chacun désire contribuer à la discussion » (Geoffrion, 2016, p.414). Il gère la dynamique du groupe en orientant les discussions vers les thèmes identifiés (Spiral, 2016). Le style d'animation adopté par l'animateur peut être directif, s'il décide de contrôler la discussion et de suivre de très près sa liste de questions, ou non directif, s'il laisse les participants discuter plus librement de ce qui les intéresse (Geoffrion, 2016).

Geoffrion (2016) explique que le groupe de discussion présente des avantages comme : la liberté d'expression des participants, la participation active de tous les acteurs, la compréhension approfondie des réponses en raison des reformulations et des précisions demandées, la dynamique du groupe et la flexibilité de la méthode étant donné que l'animateur adapte ses interventions à la situation. Mais la méthode possède aussi des risques que l'animateur doit éviter, comme influencer d'une façon verbale ou non verbale les participants ou laisser les réticences ou les complaisances de certains participants fausser l'orientation des échanges.

Dans le cadre de la présente recherche, le premier groupe de discussion visant l'exploration et l'analyse de la situation, comptait dix enseignants dont : 6 enseignants travaillant au même établissement ont été sollicités pour participer à la recherche et ont accepté; 4 enseignantes n'ont pas été sollicités pour participer à la recherche et ceci pour diverses raisons dont les principales : 1) le choix de l'école où se déroule la recherche est intentionnel et un environnement d'accompagnement professionnel¹⁹ pour la discipline de chimie est déjà créé; 2) L'établissement scolaire où se déroulent les activités de perfectionnement est éloigné du domicile et du lieu de travail des 4 enseignantes. À noter que durant le DBR une interaction entre les enseignantes a été sollicitée pour développer la compétence de travail d'équipe pour donner plus de crédibilité à la collaboration souhaitée dans le DBR. Il s'agissait d'enseignants

¹⁹ Comme le montre le modèle adopté pour la recherche (voir figure 7), un environnement d'accompagnement professionnel est essentiel pour mieux gérer un DBR.

de chimie au secondaire ayant entre 2 et 20 ans d'expérience. Les groupes de discussion des autres phases de la recherche ont regroupé les 6 enseignantes participantes.

L'analyse des verbatim du groupe de discussion de chacune des phases de la recherche a été effectuée à l'aide du logiciel *QDA miner*.

3.10.2 Le test

Le test est « un instrument de mesure » visant une « représentation métrique » de l'objet mesuré. C'est « un instrument d'observation indirecte » (Gaudreau, 2011). Dans le cadre d'une recherche, pour construire un test, il faut se référer à des concepts définis dans le cadre théorique.

Dans le cas de la recherche présente, le test administré durant la première étape visait surtout à faire un portrait de la connaissance et de la compréhension de divers concepts de chimie, incluant le concept de mole, par les élèves.

Des tests ont eu lieu au cours ou à la fin de chaque mésocycle de la recherche ; ceci étant selon le choix de l'enseignante en fonction de l'organisation de son enseignement. L'analyse de ces évaluations a permis d'étudier l'évolution des apprentissages des élèves et le développement de leurs processus cognitifs.

3.10.3 L'entrevue individuelle

L'entrevue individuelle est l'un des outils les plus utilisés dans les méthodes qualitatives ; elle consiste à rencontrer d'une façon isolée chacun des participants de la recherche et de s'entretenir avec lui sur un thème ou sur une action réalisée au cours de la recherche (Gaudreau, 2011). Dans le cadre de la présente recherche, l'entrevue individuelle visait « la verbalisation de l'action » (Vermersch, 2014, p. 9), l'identification des raisonnements déployés au cours de l'action, les représentations et les conceptions mis en œuvre au cours de l'action (Gaudreau, 2011).

Des enregistrements vidéo, montrant les différents comportements (gestuels, visuels), ainsi que des traces écrites (documents, brouillons) peuvent compléter les données recueillies au cours d'une entrevue (Gaudreau, 2011 ; Vermersch, 2014).

L'entrevue individuelle peut être ouverte, semi-structurée ou structurée. Elle est ouverte si l'intervieweur pose une question ouverte et laisse la parole à l'interviewé qui se lance dans un discours libre. Elle est structurée si l'intervieweur pose des questions agencées selon un ordre déterminé et dont les réponses appartiennent à un champ limité au thème choisi. L'entrevue semi-structurée est un composite des deux autres (Gaudreau, 2011).

Dans le cadre de la présente recherche, une entrevue guidée avec les enseignantes qui ont expérimenté la séquence a eu lieu au début de chaque méso-cycle pour permettre le partage des expériences en classe et une entrevue individuelle semi-structurée a eu lieu à la fin de la formation. Les guides de discussion de l'entrevue réalisée au début de chaque mésocycle et de celle réalisée au dernier mésocycle sont placés à l'annexe 7 et à l'annexe 11 respectivement.

Les entrevues animées avaient pour but : d'identifier l'effet de la formation sur les pratiques professionnelles des enseignantes ; d'identifier le changement conceptuel des enseignantes sur l'enseignement et les savoirs du concept de mole ; d'identifier l'évolution des connaissances pratiques des enseignantes.

3.10.4 L'analyse de documents

L'analyse de documents, qui peut porter sur un ou plusieurs documents, repose sur les techniques de l'analyse de contenu. Elle consiste à « déceler, quantifier, voire évaluer les idées » et permet d'obtenir « une vue d'ensemble » de la situation (Leray et Bourgeois, 2016, p. 428).

De façon plus précise, l'analyse de contenu permet, par exemple, d'effectuer un recensement de données, de mesurer des fréquences d'apparition des thèmes et de saisir des intentions personnelles (Leray et Bourgeois, 2016, p. 431).

L'analyse se fait selon des grilles construites en fonction de la nature du contenu (Gaudreau, 2011). Dans une grille d'analyse de documents, le contenu à analyser est classé en thèmes et sous-thèmes. La finalité de l'analyse peut être de critiquer la qualité du contenu ou d'identifier les caractéristiques principales de ce contenu en rapport avec la question de recherche. Des codes, des catégories et des unités de sens retenus à priori facilitent la construction de ces grilles (Leray et Bourgeois, 2016).

Dans le cas de la présente recherche, les fiches de préparation de l'enseignement du concept de mole rédigées par des enseignants ont été analysées. Les grilles d'analyse ont été élaborées en se référant aux travaux de Thouin (2017a), Khzami et al. (2010) et Braun (2010). Cette analyse visait à identifier le modèle pédagogique des enseignants.

4 Présentation et analyse des résultats

4.1 Rappel sur le déroulement global de la formation

Six enseignantes ont participé à cette recherche. Ces enseignantes travaillent au même établissement scolaire, l'école Saint Joseph des Filles de la Charité (ville de Zouk- Liban). L'étudiante-chercheure a occupé le poste de conseillère pédagogique en sciences et plus particulièrement en chimie à cet établissement. Un environnement d'accompagnement professionnel existait au moment où cette recherche a commencé. Cet environnement est essentiel dans le déroulement du DBR dont la caractéristique principale est l'homomorphisme (voir figure 7).

Le profil des enseignantes est décrit au tableau 5 : elles n'ont pas le même nombre d'années d'expertise ; la spécialité de trois d'entre elles est la chimie ; elles n'ont pas le même nombre d'élèves en classe, mais le milieu socio-économique de tous les élèves est le même et les classes sont hétérogènes (résultats scolaires plus ou moins forts). En conséquence, en dépit de la différence du nombre d'élève par classe, on constate une équivalence dans la composition des groupes. Le certificat d'éthique ne permettait pas à l'étudiante-chercheure de vérifier l'efficacité des apprentissages sur une base individuelle. Toutefois, l'équivalence dans la composition des différentes classes réduit, pour l'essentiel, l'effet-classe à l'effet maître.

Comme précisé dans le chapitre précédent, le macrocycle de DBR a comporté 5 mésocycles : un premier mésocycle d'analyse et d'exploration, trois mésocycles de construction et d'amélioration du matériel didactique et un dernier mésocycle d'analyse et de réflexion.

4.2 Le déroulement de chacun des mésocycles

4.2.1 Le mésocycle (1) : Analyse et exploration

Tel que décrit ci-dessus, la collecte de données a commencé par le mésocycle d'analyse et d'exploration pour : 1) déterminer le modèle pédagogique des enseignantes ; 2) identifier les difficultés d'enseignement vécues par les enseignantes et les solutions adoptées ; 3) vérifier l'existence d'obstacles didactiques, relatifs au concept de mole chez les élèves.

Tout d'abord, l'étudiante-chercheuse a animé un groupe de discussion avec 10 enseignants du secondaire, incluant les six enseignantes participantes. Le guide de discussion (Annexe 4), montre que la discussion a porté, en introduction, sur l'enseignement des sciences au secondaire. Puis, les enseignantes ont été invitées à partager leur expérience au sujet de l'enseignement de la chimie. On pouvait s'attendre à ce qu'elles critiquent le programme de chimie du secondaire, qu'elles s'expriment au sujet des difficultés d'enseignement et des méthodes adoptées pour les surmonter et qu'elles précisent la nature des difficultés d'apprentissage en chimie auxquelles elles sont confrontées dans leur classe. Enfin, la discussion a porté plus particulièrement sur le concept de mole : les enseignantes ont été invitées à expliciter leur façon d'enseigner ce concept et les difficultés d'apprentissage rencontrées en classe.

Ensuite, l'étudiante-chercheuse a analysé les fiches de préparation de l'enseignement du concept de mole écrites par les enseignantes participantes. Cette analyse a permis de mieux identifier le modèle pédagogique de ces enseignantes et de préciser, en se basant sur la littérature scientifique présentée dans le cadre de cette recherche, les obstacles didactiques que leur modèle pourrait causer.

Enfin, un test diagnostique destiné à 108 élèves a été conçu par, Marthe, une des enseignantes participantes. En effet, Marthe intervient également à des niveaux scolaires supérieurs (le lycée) auprès d'élèves à qui elle a enseigné le concept de mole en EB9 (au niveau scolaire où se déroulait cette recherche). Selon le programme libanais, en première année du lycée (classe de seconde qui vient juste après la classe de EB9), elle doit développer le concept de la mole pour préparer l'enseignement de la stœchiométrie et de l'analyse quantitative. Marthe a l'habitude de commencer l'enseignement du concept de mole, au lycée, par un test diagnostique visant à évaluer les prérequis de ses élèves admis en seconde. Dans le cadre de cette recherche, elle a construit le test diagnostique en collaborant avec l'étudiante-chercheuse et elle a partagé les résultats du test avec l'équipe durant la première rencontre. L'analyse de ces résultats a confirmé les obstacles didactiques et les difficultés de ses élèves relatifs au concept de mole. Les élèves de Marthe en seconde qui ont passé ce test ont formé le groupe témoin par rapport auquel ont été comparés les résultats des évaluations effectuées durant les mésocycle s suivants.

La construction et l'amélioration du matériel didactique ont eu lieu durant les micro-cycles qui constituent le mésocycle 2 (construction du matériel didactique), le mésocycle 3 (amélioration du matériel didactique) et le mésocycle 4 (suite de l'amélioration du matériel didactique).

4.2.2 Le mésocycle (2) : Conception de matériel didactique

Ce mésocycle a commencé par un retour sur les points essentiels soulevés pendant le groupe de discussion animé durant le mésocycle précédent et portant uniquement sur l'analyse et l'exploration. De plus, une enseignante a présenté le résultat d'une évaluation diagnostique (voir Annexe 6) proposée à des élèves à qui elle avait enseigné le concept de mole durant l'année scolaire précédente. Après ce retour sur l'exploration, un microcycle de conception de matériel didactique a été déclenché. Une première activité de perfectionnement a été animée par l'étudiante-chercheure. Cette activité de perfectionnement visait l'explicitation des difficultés d'enseignement et d'apprentissage en sciences et plus particulièrement en chimie, les conceptions et les obstacles d'apprentissage relatifs au concept de mole, les critères d'une bonne analogie et l'explicitation de l'enseignement de la modélisation. Les enseignantes n'étaient pas très à l'aise avec la notion de conceptions alternatives et ont cherché des conceptions pour certains concepts. Durant cette activité de perfectionnement, il s'agissait d'identifier des conceptions alternatives relatives au concept de mole. L'étudiante-chercheure a établi les relations entre les conceptions trouvées et l'évolution socio-historique du concept (tableau 1). Par la suite, les participantes ont construit la première version de la séquence d'enseignement et d'une évaluation. Après la rencontre, les enseignantes Élise et Joëlle ont animé la séquence dans leur classe. Elles ont évalué les apprentissages des élèves et partagé les résultats avec l'étudiante-chercheure pour les analyser. L'analyse de ces résultats et leur partage constitue le microcycle d'évaluation et de réflexion. Le test bêta servant à valider la viabilité de l'intervention consistait en : un partage guidé entre les enseignantes²⁰ et l'analyse des réponses des élèves à une évaluation sommative. Les objectifs de ce test bêta étaient : 1) d'identifier une évolution des connaissances professionnelles des enseignantes ; 2) d'identifier une évolution de

²⁰ Voir le « Guide du partage entre les enseignantes » (Annexe 7).

l'efficacité d'apprentissage chez les élèves ; 3) d'identifier les besoins et les problèmes persistants. Ce troisième objectif est traité dans le cadre du test alpha qui amorce le mésocycle suivant. Un troisième mésocycle a alors été enclenché.

4.2.3 Le mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique

Le mésocycle (3) a commencé par un microcycle d'analyse et d'exploration au cours duquel les enseignantes Élise et Joëlle ont partagé leur expérience en classe et ont fait un inventaire des points à conserver et des points à améliorer dans la séquence construite. L'étudiante-chercheuse a guidé ce partage pour l'optimiser (voir le guide de questionnement, Annexe 7). Les enseignantes ont relaté les moments forts vécus en classe, les difficultés survenues, et elles ont présenté les résultats de l'évaluation des élèves. En se basant sur leur expérience en classe, elles ont proposé des améliorations à la séquence construite qui sont décrites dans le paragraphe suivant. Après cet échange, un microcycle de construction qui, cette fois, visait plutôt l'amélioration du matériel didactique déjà construit a été enclenché. L'étudiante-chercheuse a animé une activité de perfectionnement portant sur le langage et sur l'évitement des erreurs sémantiques. Ce choix de thème était intentionnel puisque des erreurs sémantiques se sont glissées dans le discours des enseignantes et dans la construction de la première version de la séquence. Cette activité a été une bonne occasion de faire des liens entre les erreurs sémantiques et l'évolution socio-historique du concept. Enfin, les participantes ont révisé la séquence construite en tenant compte des améliorations proposées par Élise et Joëlle et du contenu de la formation reçue. Après cette rencontre, Cynthia et Aya ont piloté la séquence dans leur classe. Comme durant le mésocycle précédent, les résultats ont été analysés durant un microcycle d'évaluation et de réflexion.

4.2.4 Mésocycle (4) : Suite de l'amélioration du matériel didactique

Le mésocycle (4) a suivi le même déroulement que le mésocycle (3). Les commentaires des deux enseignantes, Cynthia et Aya, semblaient plus rassurants à propos du contenu de la séquence. Les résultats de l'évaluation étaient aussi plus satisfaisants en ce qui concerne le développement de schèmes cognitifs et l'évitement de confusions langagières. Durant cette

rencontre, les 6 enseignantes ont informé l'étudiante-chercheuse de leurs échanges informels durant leurs heures libres. Ces échanges ont été, selon elles, fructueux pour mieux réussir la gestion didactique et pédagogique de la classe et pour augmenter leur motivation intrinsèque. Elles ont même tenu un journal de bord pour ne rien oublier durant les échanges qui ont eu lieu durant la rencontre avec l'étudiante-chercheuse. Les résultats étaient probants, le seul inconvénient mentionné était le temps : la séquence d'enseignement est longue ! Malgré tout, les 6 enseignantes ont décidé de garder la même version de la séquence et d'ajouter une petite section leur permettant de mieux identifier les schèmes cognitifs développés. Durant les activités de perfectionnement, il a souvent été question de l'évolution socio-historique de ce concept : durant des échanges informels avec l'étudiante-chercheuse les 6 enseignantes ont posé des questions au sujet des travaux d'Avogadro, du choix de l'atome de carbone et des définitions. L'étudiante-chercheuse en a profité pour planifier la dernière activité de perfectionnement portant sur l'évolution socio-historique du concept de mole. Les 6 enseignantes ont conçu un résumé vulgarisé de l'histoire de la mole et ont décidé de l'animer durant la séquence d'enseignement.

À noter que durant les mésocycles de conception du matériel et de son amélioration, les enseignantes ont intégré des acquis de formations didactiques antérieures à la recherche. Par exemple, elles ont construit des activités en intégrant des techniques de gestion d'équipes (exemple : Philips²¹, *Jigsaw*²²) reconnues pour favoriser des interactions entre les élèves et des engagements dans leurs apprentissages. L'étudiante-chercheuse n'a pas animé de formation spécifique sur l'évaluation puisque les enseignantes étaient bien formées sur ce sujet. De même, la curiosité des 6 enseignantes au sujet des repères culturels était stimulée par des acquis de formations antérieures portant sur la résolution de problèmes scientifiques et technologiques (pendant lesquelles les repères culturels avaient été abordés).

²¹ Cette technique consiste à répartir les élèves en équipe. Toutes les équipes travaillent la même tâche. Un retour collectif permet de partager et de corriger les réponses.

²² Cette technique consiste à répartir les élèves en équipes. Chaque élève d'une équipe reçoit une tâche. Il y réfléchit pendant quelques minutes. Les élèves sont répartis par tâche. Chaque équipe doit résoudre la tâche et la corriger auprès de l'enseignant. Chaque élève retourne à son équipe principale pour expliquer à ses collègues sa tâche.

4.2.5 Le mésocycle (5) : Impact de la formation

Finalement, le dernier mésocycle a comporté un microcycle d'évaluation et de réflexion. Ce mésocycle a commencé par un groupe de discussion dont les objectifs étaient : 1) identifier les effets de la formation sur l'évolution des connaissances disciplinaires des enseignantes participantes ; 2) identifier les effets de la formation sur l'évolution des connaissances didactiques des enseignantes participantes ; 3) identifier les effets de la formation sur l'engagement des enseignantes participantes dans un processus de formation continue. La discussion a porté tout d'abord sur une présentation globale des élèves (niveaux, milieu socioéconomique, etc.) puis chacune des enseignantes a présenté la façon dont elle avait vécu cette formation en classe, dans le travail d'équipe, durant les rencontres, etc. Finalement, l'étudiante-chercheure leur a demandé quelle serait leur motivation à s'engager dans un nouveau DBR et quel concept de chimie elles choisiraient. Après le groupe de discussion, des entretiens d'explicitation se sont tenus selon la disponibilité des participantes. Les objectifs de ces entretiens étaient identiques à ceux du groupe de discussion.

Durant ce mésocycle, une évaluation, ou test gamma, a été faite à partir de l'analyse d'un groupe de discussion²³, d'entretiens d'explicitation²⁴ et des résultats des élèves²⁵. Ce test gamma a permis de vérifier l'atteinte de l'objectif général de recherche (formulé à la fin de la problématique) et d'en déduire l'impact d'une formation, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur l'évolution de leur connaissances et leurs compétences professionnelles en enseignement de la chimie et plus particulièrement sur l'enseignement du concept de mole. Après la fin des cycles du DBR, une évaluation globale de la formation et du matériel didactique a été réalisée.

Avant de présenter les résultats de la recherche et de les analyser, un résumé du déroulement de chacun des mésocycles semble pertinent. Il est présenté dans le tableau ci-dessous. À noter que l'annexe 9 présente une description détaillée de chacune des activités de perfectionnement animées par l'étudiante-chercheure ainsi que le matériel didactique créé puis amélioré durant chacun des mésocycles.

²³ Voir le « Guide de discussion du groupe de discussion (Phase d'évaluation et de réflexion) » (Annexe 10)

²⁴ Voir le « Guide de l'entrevue individuelle » (Annexe 11).

²⁵ Ces résultats sont présentés et analysés dans un paragraphe situé plus loin.

Mésocycle	Activités	Objectifs des activités	Déroulement des activités	Évènements marquants
Mésocycle (1) : Analyse et exploration	<ul style="list-style-type: none"> - Groupe de discussion. - Analyse de fiches de préparations. - Évaluation diagnostique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer le modèle pédagogique des enseignantes. - Identifier les difficultés d'enseignement vécues par les enseignantes ainsi que les solutions adoptées. - Vérifier l'existence des obstacles didactiques relatifs au concept de mole chez les élèves. 	<ul style="list-style-type: none"> - Animer un groupe de discussion avec 10 enseignantes dont les enseignantes participantes (voir guide de discussion, Annexe 4). - Construire une grille d'analyse des fiches de préparations et la compléter (voir annexe 5). - Construire une évaluation diagnostique (voir Annexe 6) ; faire l'évaluation et analyser les résultats. Le nombre d'élèves qui ont fait l'évaluation diagnostique est 108. 	<p>Les résultats corroborent la littérature scientifique explorée dans le cadre théorique. Les obstacles d'apprentissage, et plus particulièrement didactiques, existent chez les élèves. Les enseignantes sous-estiment la difficulté du concept de mole dans la progression des apprentissages et possèdent des représentations très superficielles des approches constructivistes.</p>

Mésocycle (2) : Conception du matériel didactique	Retour sur le <i>focus group</i> et le test diagnostique (nommé aussi prétest sur les histogrammes).	<ul style="list-style-type: none"> - Rappeler aux participantes des points importants abordés durant le groupe de discussion. - Communiquer aux enseignantes l'analyse des résultats d'un test diagnostique proposé par une des participantes à ses anciens élèves (108 élèves) 	<ul style="list-style-type: none"> - Préciser les difficultés d'apprentissage mentionnées durant le groupe de discussion. - Rappeler la place du concept de mole dans la progression des apprentissages. - Rappeler les difficultés d'enseignement soulevées durant le groupe de discussion. - Présenter les difficultés d'apprentissage ciblées dans les réponses des élèves au test diagnostique. 	
	Activité de perfectionnement.	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les conceptions alternatives et les obstacles d'apprentissage en chimie et plus particulièrement pour le concept de mole. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lire et synthétiser un article²⁶ (travail en binômes des participantes). - Mettre les informations en commun. - Faire une synthèse (l'étudiante-chercheure). 	<ul style="list-style-type: none"> - Relier les obstacles d'apprentissage à l'évolution socio-historique du concept de mole.

²⁶ L'étudiante-chercheure propose trois articles aux participantes. Chaque équipe choisit un article. Les trois articles proposés sont :

- 1- Dupin, J.-J., et Joshua, S. (1994). Analogie et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, (3), 9-26.
- 2- Legendre, M.-F. (1994). Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire : un état de la question. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(4), 657. <https://doi.org/10.7202/031761ar>
- 3- Martinand, J. L. (1996). Introduction à la modélisation. *Actes du séminaire de didactique des disciplines technologiques*, 1994-95.

		<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les difficultés d'enseignement et d'apprentissage en sciences et plus particulièrement en chimie. - Déterminer les caractéristiques d'une bonne analogie. - Expliciter l'enseignement de la modélisation. 		
	Conception du matériel didactique.	<ul style="list-style-type: none"> - Construire la séquence. - Adopter l'évaluation diagnostique comme première évaluation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Répertorier les obstacles d'apprentissage relatifs au concept (l'étudiante-chercheur). - Construire une analogie efficace (les enseignantes / l'étudiante-chercheur). - Construire des activités autour des obstacles identifiés (les enseignantes / l'étudiante-chercheur). - Préciser les définitions à adopter (les enseignantes / l'étudiante-chercheur). - Planifier la gestion de classe (gestion de matériel, gestion des équipes, etc.) (les participantes). 	<ul style="list-style-type: none"> - La séquence proposée tient compte de l'aspect qualitatif et de l'aspect conceptuel. L'aspect nombre, l'aspect masse et le lien entre eux sont travaillés. - Durant la manipulation, les élèves donneront des noms de leur choix au nombre (l'équivalent du nombre d'Avogadro) et à l'assemblage (l'équivalent de la mole). - Dans les activités proposées, les élèves manipulent avec des grains de sucres ou d'épices. Les élèves sont amenés à créer des groupements contenant un nombre déterminé de grains selon une masse donnée. Ils nommeront le nombre de grains « nombre de ... » et nommeront le groupement selon leur choix. Durant toutes les activités les élèves

				<p>conservent ces termes jusqu'au moment où l'enseignant effectue le transfert du domaine de référence au domaine cible.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les grains de sucre (ou d'épices) n'ont pas tous exactement la même masse. La masse d'un nombre donné de grains peut être considérée comme l'équivalent de la masse molaire moyenne d'un élément (en considérant ses isotopes). La notion de masse molaire moyenne de l'élément est acquise par les élèves. - L'analogie tient compte du fait que le nombre d'Avogadro n'est pas dénombrable et ne peut être déterminé qu'à partir de la masse ou du volume (dans le cadre de l'activité proposée). - Le lien entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique est créé à travers une animation. - La manipulation favorise la création des modèles théoriques relatifs à la mole.
	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes Élise et Joëlle animent leur classe. - Les enseignantes corrigent les évaluations et les analysent en collaborant avec l'étudiante-chercheuse. 			

<p style="text-align: center;">Mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique</p>	<p>Retour réflexif de la part de Joëlle et d'Élise.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Partager les moments forts et des moments de difficultés avec les autres participantes. - Proposer des améliorations en se basant sur l'expérimentation avec les élèves. 	<ul style="list-style-type: none"> - Décrire l'expérimentation de la séquence en classe (les enseignantes). - Guider le discours pour mettre à profit l'expérience vécue par chacune des enseignantes (l'étudiante-chercheure) (voir Annexe 7). 	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes avouent leurs craintes au début de la séquence. Elles craignent la réaction des élèves et leur propre gestion de classe. - Les élèves manifestent une motivation et un engagement surprenants durant la tâche. - Les élèves verbalisent des processus cognitifs. La manipulation leur permet d'ajuster leur démarche et de créer des schèmes cognitifs pertinents. - Les élèves évitent de se servir d'algorithmes de façon automatique dans la résolution des problèmes. - Les symboles et l'expression « quantité de matière » restent une source de confusion. - Le lien entre le volume et la quantité de matière doit encore être consolidé par des activités. - Les tâches s'avèrent simples, il est souhaitable d'ajouter des tâches complexes pour confirmer la construction des schèmes cognitifs.
---	---	---	---	--

<p>Activité de perfectionnement</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rappeler les caractéristiques de l'enseignement par analogie. - Distinguer les différents types d'erreurs sémantiques. - Rappeler le changement des expressions durant l'évolution socio-historique du concept. 	<ul style="list-style-type: none"> - Insister sur l'importance de la création du lien entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique. - Rappeler la création du tableau de transfert entre le domaine de référence et le domaine cible, les domaines et les limites de l'analogie. - Expliquer les erreurs sémantiques. - Faire le lien entre les erreurs sémantiques et les conceptions des élèves. 	
<p>Révision de la séquence.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Réviser les activités et les exercices proposés. - Vérifier les erreurs sémantiques dans les différents textes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajouter des tâches complexes. - Ajouter des exercices (relation entre n et V ; n et m) dont la résolution suppose une manipulation. - Vérifier que les exercices sont différenciés et relèvent de liens entre différents domaines (les enseignantes et l'étudiante-chercheure). 	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes apprécient l'apprentissage résultant des activités proposées aux élèves. Elles ajoutent des activités durant lesquelles les élèves doivent manipuler pour relever un défi.
<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes Cynthia et Aya animent leur classe. - Chacune des enseignantes a environ 32 élèves dans sa classe - Les enseignantes corrigent les évaluations et les analysent en collaborant avec l'étudiante-chercheure. 			

Méso-cycle (4) : Suite de l'amélioration du matériel didactique	Retour réflexif de la part de Cynthia et Aya.	<ul style="list-style-type: none"> - Partager les moments forts et les moments de difficultés avec les autres participantes. - Proposer des améliorations en se basant sur l'expérimentation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Décrire l'expérimentation de la séquence en classe (les enseignantes). - Guider le discours pour mettre à profit l'expérience vécue par chacune des enseignantes (l'étudiante-chercheure) (voir Annexe 7). 	<ul style="list-style-type: none"> - Les élèves manifestent une motivation et un engagement dans la tâche. - Les enseignantes notent leur peur durant la première séance. Elles craignaient la réaction des élèves. - Les enseignantes notent que la première activité a duré longtemps. Mais une fois que le schème cognitif a été construit, les élèves étaient plus à l'aise à poursuivre. - Les enseignantes font remarqué l'effet de l'animation de <i>Scale of the Universe</i> qui a aidé à créer les liens entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique. - Les enseignantes ont trouvé que la gestion des équipes n'était pas évidente étant donné le grand nombre d'élèves.
	Activité de perfectionnement	Faire un retour sur l'histoire du concept.	<ul style="list-style-type: none"> - Distinguer le paradigme de la théorie atomique du paradigme de l'équivalence des masses. - Indiquer que le nombre d'Avogadro n'a pas été déterminé par Avogadro. - Préciser que le concept de mole n'a pas été défini par Avogadro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes avaient reçu un article²⁷ portant sur l'évolution socio-historique du concept ; la formation a été animée sous forme d'un débat autour de cet article. À noter que l'histoire du concept de mole a été abordée et liée au contenu de chacune des activités de perfectionnement. Cette activité a visé de créer un repère culturel qui sera ajouté au matériel didactique.

²⁷ 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.

	Révision de la séquence.	<ul style="list-style-type: none"> - Réviser les activités et les exercices. - Construire l'activité sur le repère culturel. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proposer une nouvelle évaluation formative consistant à ce que les élèves rédigent par équipe une consigne et un corrigé d'un exercice. - Construire un diaporama, d'une durée 5 minutes, sur l'évolution socio-historique du concept. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes Marthe et Joanne animent leur classe. - Les enseignantes corrigent les évaluations et les analysent en collaborant avec l'étudiante-chercheure. - Un exercice ajouté concernant une consigne et le corrigé d'un exercice ont retenu l'attention des enseignantes. 				

Mésocycle (5) : Impact de la formation	Retour réflexif par Marthe et Joanne.	<ul style="list-style-type: none"> - Partager les moments forts et les moments de difficultés avec les autres participantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Décrire leur expérience en classe (les enseignantes). - Guider le discours pour mettre à profit l'expérience de chacune des enseignantes (l'étudiante-chercheure) (voir Annexe 7). 	<ul style="list-style-type: none"> - Les enseignantes ont noté la motivation et l'engagement des élèves dans la tâche. - Les enseignantes notent le développement de schèmes cognitifs chez les élèves. - Les enseignantes partagent les résultats de l'analyse de l'exercice ajouté (concernant la construction d'une consigne et d'un corrigé d'un exercice) ; les résultats confirment que la plupart des élèves se sont appropriés le concept.
	<ul style="list-style-type: none"> - Groupe de discussion. - Entretiens individuels. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faire un retour sur les étapes de l'expérimentation. - Déterminer les effets de la formation sur les connaissances disciplinaires des enseignantes. - Déterminer les effets de la formation sur les connaissances didactiques des enseignantes. - Déterminer les effets de la formation sur l'engagement de l'enseignante dans une formation continue. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rencontrer les enseignantes en groupe (voir le guide discussion, Annexe 10). - Rencontrer individuellement chaque enseignante (voir guide de l'entretien, Annexe 11). 	

4.3 Les résultats du mésocycle (1) : Analyse et exploration

Dans ce qui suit, les résultats obtenus avec chaque instrument de collecte de données seront présentés. L'interprétation des résultats est présentée plus loin.

4.3.1 Le groupe de discussion

Tel que consigné dans le guide du groupe de discussion (Annexe 4), la discussion a porté sur les thèmes suivants : la méthode d'enseignement, la gestion des apprentissages et le concept de mole. La discussion autour de ces thèmes devraient fournir des réponses aux objectifs du mésocycle 1 : déterminer le modèle pédagogique des enseignantes, identifier les difficultés d'enseignement vécues par les enseignantes et les solutions adoptées et vérifier l'existence d'obstacles didactiques, relatifs au concept de mole chez les élèves. L'analyse qualitative²⁸ du verbatim du groupe de discussion, a fait émerger les catégories et les sous-catégories présentées dans le tableau 7. Les catégories ont émergé des réponses des enseignantes aux thèmes proposés dans le guide de discussion. Les sous-catégories ont été créés selon la nature des réponses des enseignantes. Par exemple, la plupart ont décrit des méthodes d'enseignement traditionnelles et opératoires où l'élève écoute une explication, étudie et applique des algorithmes. Par ailleurs, elles ont critiqué les limites des manuels. Les enseignantes n'ont pas mentionné de difficultés d'enseignement personnelles ou disciplinaires ; elles ont parlé de difficultés dues au curriculum et au nombre d'élèves élevé dans leur classe. Comme dans les méthodes traditionnelles, les difficultés d'apprentissage sont expliqués par un manque d'habiletés et d'attitudes chez les élèves ; la remédiation consiste à répéter l'explication et à fournir de nombreux exercices. Ces sous-catégories ont été retenues puisqu'elles corroborent les caractéristiques d'un modèle d'enseignement traditionnel. Ce modèle est aussi apparent dans l'enseignement du concept de mole. Une attention a été portée à la façon dont les enseignantes explicitent les aspects quantitatif et qualitatif. Tel qu'indiqué plus loin, les sous-catégories en lien avec la mole montrent que le répertoire d'obstacles d'apprentissage décrit dans le cadre théorique se retrouve sur le terrain d'expérimentation. Des moments de silence

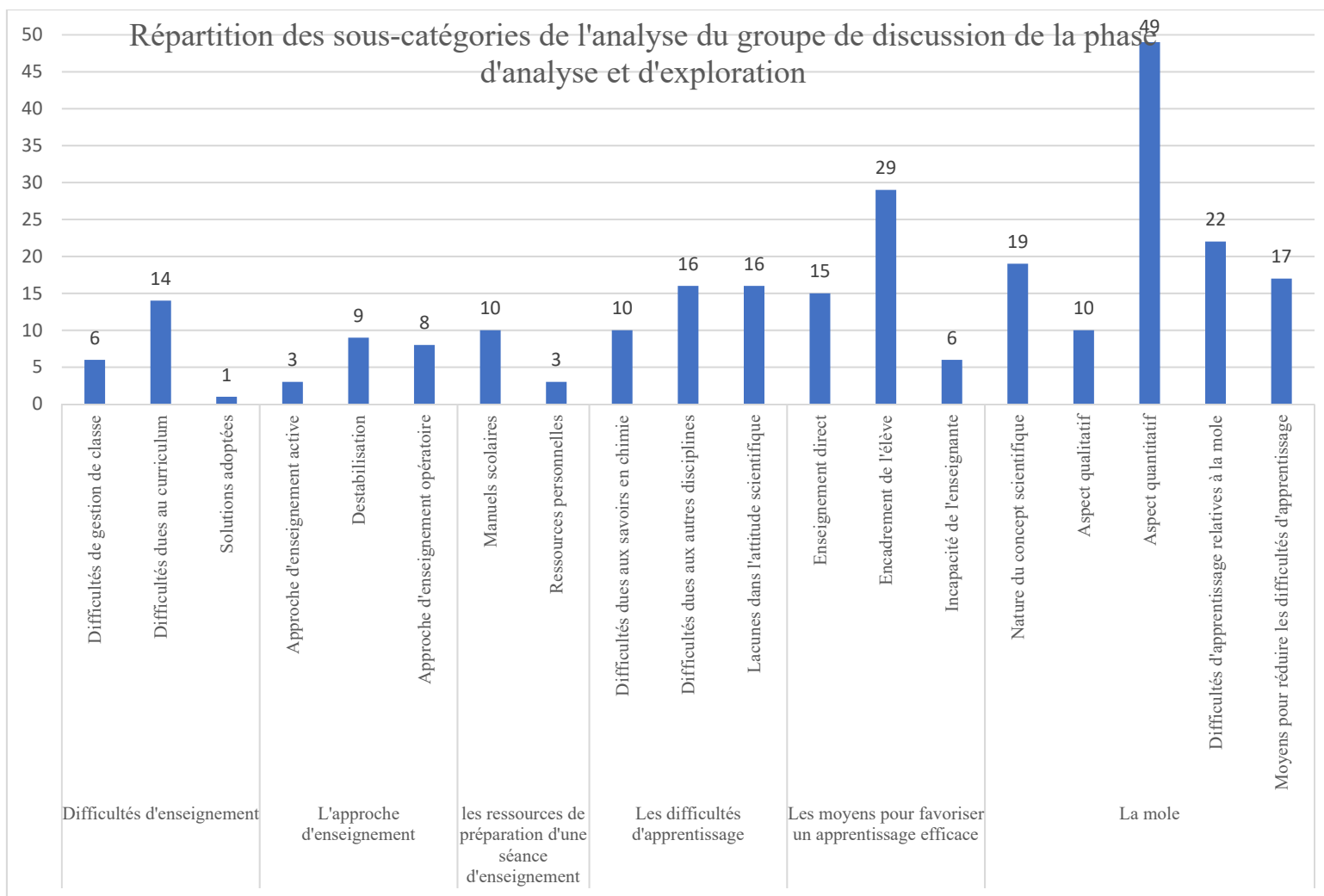
²⁸ L'analyse qualitative des données est faite à l'aide du logiciel QDA minor.

remarquables ont été placés dans la sous-catégorie déstabilisation, surtout que ces moments surviennent quand la discussion porte sur l'approche d'enseignement adoptée.

Thème	Catégories	Sous-catégories
La méthode d'enseignement adoptée	L'approche d'enseignement	Approche d'enseignement active
		Approche d'enseignement opératoire
		Déstabilisation
	Les difficultés d'enseignement	Difficultés dues au curriculum
		Difficultés de gestion de classe
		Solutions adoptées
	Les ressources de préparation d'une séance d'enseignement	Manuels scolaires
Ressources personnelles		
La gestion des apprentissages	Les difficultés d'apprentissage	Difficultés dues aux savoirs en chimie
		Difficultés dues aux autres disciplines
		Difficultés dues à un manque d'attitude scientifique
	Les moyens pour favoriser un apprentissage efficace	Enseignement direct
		Encadrement de l'élève
		Incapacité de l'enseignante
La mole	La mole	Nature du concept scientifique
		Aspect qualitatif
		Aspect quantitatif
		Difficultés d'apprentissage relatives à la mole
		Moyens pour réduire les difficultés d'apprentissage

Tableau 6 : Les catégories et les sous-catégories qui ont émergé de l'analyse qualitative du groupe de discussion de la phase d'analyse et d'exploration

L'histogramme suivant présente la répartition des sous-catégories :



Histogramme 1 : Histogramme représentant la répartition des sous-catégories de l'analyse du groupe de discussion de la phase d'analyse et d'exploration.

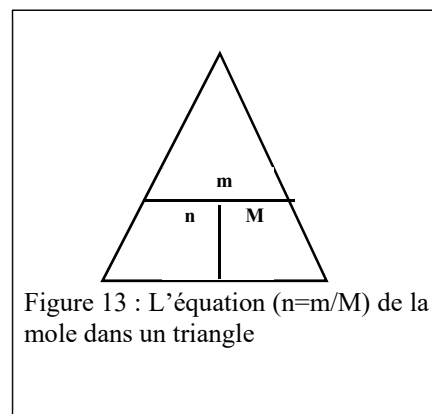
Ce qui était remarquable est que les enseignantes ont utilisé dans leur discours les verbes suivants : mémoriser (11 fois) ; étudier (7 fois) ; retenir (6 fois) ; réciter (5 fois) et expliquer (3 fois), ce qui témoigne d'une approche traditionnelle. Les enseignantes ont mentionné qu'elles se sont servies de simulations et d'animations, dans leur cours, et qu'elles ont animé peu de séances de travaux pratiques au laboratoire, soit parce que le laboratoire était situé loin des classes, dans l'école, soit en raison du nombre élevé d'élèves par classe.

Pour préparer leurs cours, les enseignantes se sont basées sur les manuels scolaires ou sur des blogs où elles peuvent trouver des cours déjà préparés. Cela dit, les enseignantes étaient insatisfaites des manuels scolaires qui, selon elles, sont une bonne source d'exercices d'applications mais manquent d'informations et d'explications qui pourraient aider l'élève à étudier. Toutes les participantes ont confirmé qu'elles consultent plusieurs manuels scolaires pour élaborer la synthèse que l'élève doit étudier.

Les enseignantes ont avoué éprouver des difficultés de gestion du contenu du programme de chimie et des difficultés de gestion du nombre élevé d'élèves en classe. Elles trouvent que le programme est surchargé qu'il y aurait avantage à ce qu'il soit allégé. En plus, le nombre d'heures obligatoire prévu pour la chimie (2 périodes de 50 minutes chacune par semaine) leur semble insuffisant. La seule solution qu'elles proposent est de prévoir et de planifier quelques cours supplémentaires. Les enseignantes n'ont pas mentionné de difficulté particulière relative à l'enseignement de concepts de chimie.

Les enseignantes étaient plus à l'aise de citer des difficultés d'apprentissage dues aux caractéristiques des élèves, aux autres disciplines et à la complexité du contenu, que de citer des difficultés rencontrées dans leur pratique d'enseignement. Tout d'abord elles se plaignent de leur attitude peu studieuse (ou manque d'attitude scientifique) : les élèves « ne réfléchissent pas », « ils veulent terminer rapidement », « ils n'étudient pas ».

Comme solutions, elles ont proposé un encadrement qui consiste à : répéter l'explication, proposer un grand nombre d'exercices, enseigner des algorithmes. Les enseignantes constatent les difficultés des élèves à transférer, aux domaines des sciences, leurs connaissances en mathématiques. Elles soulèvent aussi des difficultés linguistiques : le français n'étant pas leur



langue première (qui est l'arabe), les élèves ont de la difficulté à comprendre les consignes. Les enseignantes remédient à ces difficultés en enseignant des algorithmes pour mener un calcul (voir figure 13) ou en montrant aux élèves comment repérer des unités pour identifier les variables, ce qui peut se faire malgré les difficultés en français.

Dans le programme libanais, le concept de mole est introduit au niveau scolaire EB9, à la fin d'un chapitre intitulée « atomes et molécules ». Dans ce chapitre, les exercices sont nombreux et, dans certains manuels, portent par exemple sur les éléments qui se retrouvent dans divers composés. Les enseignantes ont constaté que le concept de mole n'est pas très important puisque la suite du programme ne le mentionne plus. (« Rien n'est basé sur ce concept en EB9 » ; « Aucune notion n'est reliée à ce concept ») et, dans l'examen officiel, il ne fait l'objet que d'une seule question dont la pondération est très faible. (« Je n'ai jamais proposé de manipulations à mes élèves au sujet de la mole puisqu'à l'examen officiel c'est, maximum, 1 point ou 0,5 point. » « Malheureusement, pour le brevet officiel, c'est une perte de temps, parce qu'il y a beaucoup plus de questions qui portent sur d'autres chapitres. »). Il est vrai que le concept de mole se retrouve, dans le programme de chimie du lycée, dans le cadre des réactions chimiques et des analyses quantitatives. Voilà ce qui explique, en partie, pourquoi les enseignantes ne le trouvent pas très important au niveau EB9. Elles avouent d'ailleurs que même si elles essaient de le simplifier, « le concept reste abstrait » puisque l'élève doit « imaginer » un groupement d'atomes. La seule enseignante qui reconnaît que le concept de mole est un « concept-nœud » est une enseignante de chimie au collège et au lycée, ce qui lui permet de constater son importance pour l'apprentissage de la stœchiométrie, des dosages et de l'analyse quantitative qui font partie de la progression des apprentissages au lycée. C'est ainsi que, dans nos analyses, la sous-catégorie « Nature du concept scientifique » a surtout été attribuée à des commentaires négatifs au sujet du manque d'importance du concept de mole dans le programme de EB-9. Selon certaines enseignantes, ce concept doit être remis à plus tard puisque, d'une part, sa pondération à l'examen officiel est faible et d'autre part, l'enseignant en seconde (1^{ère} année du lycée) est obligé de le développer (« on m'a dit ce n'est pas nécessaire à l'examen officiel ; le programme est surchargé donc ils auront à peine une petite question portant sur la masse molaire atomique (application directe) pour ½ point alors on ne s'attarde pas trop sur cette notion » ; « L'enseignant de la seconde va retravailler ce concept en classe de seconde, alors pourquoi l'approfondir surtout que mon programme est surchargé »).

Les enseignantes se servent, pour expliquer le concept de quantité de matière, des analogies communes qu'on trouve dans la plupart des manuels scolaires : la douzaine, la dizaine et la centaine. Elles se rendent compte de l'imperfection de ces analogies, puisque le domaine de référence est une quantité dénombrable alors que le domaine cible ne l'est pas : (« Il y a une grande différence entre les nombres. On peut compter une douzaine, pas le nombre d'Avogadro. »). Étant donné l'immensité du nombre d'Avogadro, elles reconnaissent la difficulté du transfert entre les deux domaines, mais elles comptent en partie sur l'imagination des élèves pour appréhender cet aspect qualitatif qu'elles négligent (« Quand on parle de la quantité de matière, les élèves pourront imaginer qu'on voit une multitude de petits grains au microscope. »).

Comme le montre l'histogramme 1, les enseignantes expliquent l'aspect quantitatif du concept de mole et négligent son aspect qualitatif. À noter que les segments regroupés dans « Aspect quantitatif » portent surtout sur des formules à appliquer. De plus, les enseignantes ne présentent pas leur façon d'expliquer l'aspect quantitatif du concept. Elles insistent davantage sur les difficultés des élèves dans l'application des formules. Pour remédier à ces difficultés, elles enseignent des algorithmes mathématiques (comme le triangle de la figure 13), montrent la ressemblance avec une fraction connue en mathématique (comme $3 = 6/2$) et expliquent comment remplacer l'inconnue par le nombre adéquat et comment se retrouver dans ses calculs en faisant attention aux unités. Deux enseignantes abordent le concept en tenant compte de la définition (aspect conceptuel et aspect quantitatif) ; toutefois elles avouent qu'elles mettent plus l'accent sur l'aspect quantitatif, plus utile dans les exercices.

Les enseignantes n'ont jamais pensé à des manipulations pour expliquer ce concept. La question à ce sujet les a déstabilisées. (« On ne peut pas manipuler » ; « Que faire comme manipulations dans cette partie ? » « Comment manipuler? Avec des blocs Lego, des puzzle, en proposant des expériences ? » « Je ne vois pas d'expérience sur ce concept, au mieux une vidéo ? »)

Les enseignantes ont retrouvé, dans leur pratique, plusieurs des difficultés qui ont été répertoriées dans le cadre théorique de la présente thèse. Par exemple, elles s'attardent sur la confusion chez les élèves entre les symboles (« m » pour masse et « M » pour masse molaire). L'une des enseignante répète « n », « n », « m », « m », pour illustrer la grande confusion en partie phonétique des élèves, la difficulté de créer un lien entre le nombre et la masse, la

difficulté due à l'immensité du nombre d'Avogadro (son exposant de 23) et la confusion entre « mole » et « mol ». Toutefois, à la question quels sont les moyens adoptés pour surmonter ces difficultés, les enseignantes ont proposé de développer ou d'accepter des mécanismes opératoires tels que reconnaître la variable à partir de l'unité, changer les symboles, identifier les variables par « m minuscule » ou « petit m » et par « M majuscule » ou « grand M ». (« L'élève s'est retrouvé à l'aide des unités. » « Ils vont souligner « g » quand ils vont voir « g ». « Ils vont dire, ça c'est « petit m », la masse. » « Ils vont se rendre compte que $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, c'est la masse molaire, la quantité de matière demandée. » « Ils vont dire c'est le petit « n », donc je peux appliquer ma formule. » « Ils vont constater, j'ai deux grandeurs connues et une inconnue, donc je peux me servir de la formule. ») Les enseignantes ont aussi proposé de donner des exemples, mais qui restent du domaine macroscopique. Aucune suggestion d'aborder l'aspect qualitatif, ou de faire expliquer un raisonnement avant d'appliquer une formule, n'a été énoncée.

Des moments de silence, qui dénotaient une déstabilisation des enseignantes, ont été notés durant cet entretien. Parmi les questions posées aux enseignantes qui sont restées sans réponse : « Le fait que les élèves aient mémorisé signifie-t-il qu'ils ont compris? » « Après tout le travail fait avec les élèves, êtes-vous satisfaites de leurs acquis? » « Pensez-vous que les connaissances des élèves sont bien approfondies ? ».

En conclusion, comme le montre l'histogramme 1, les enseignantes ont surtout parlé des difficultés des élèves dues à un manque d'attitudes scientifiques et à la difficulté de transférer des concepts interdisciplinaires. Elles ont parlé longtemps de l'aspect quantitatif de la mole et ont insisté sur l'enseignement d'algorithmes. Le peu qui a été dit sur la façon d'enseigner est sans doute un indice que les enseignantes appliquent surtout des méthodes traditionnelles, basées principalement sur le contenu des manuels scolaires.

4.3.2 Les fiches de préparation

Les enseignantes participantes ont soumis la fiche de planification de leur enseignement du concept de mole. Dans l'ensemble, les fiches étaient bien organisées et leur contenu était conforme au programme. L'analyse de ces fiches (voir la grille d'analyse complétée à l'Annexe 5), confirme une dominance de l'approche dogmatique adoptée dans les

manuels : présentation des formules comme une vérité absolue, absence de repères culturels, manque de pertinence dans les définitions ou absence de définition. Dans toutes les fiches, les formules sont présentées et on ne prévoit pas de façon de les faire construire par les élèves ; les unités sont clairement indiquées, peut-être pour faciliter les choix des variables par l'élève et l'aider à effectuer ses calculs. Dans 4 des 6 fiches soumises, les définitions n'étaient pas consignées ; probablement que l'enseignante mentionne que ces définitions se trouvent dans le manuel. Dans les deux autres fiches, les définitions étaient très vulgarisées et se limitaient à présenter la mole comme la quantité d'entités chimiques équivalente au nombre d'Avogadro. Par ailleurs, dans 3 fiches, les analogies retenues n'étaient pas adéquates (utiliser des objets dénombrables, des objets de dimensions infinies) ; dans une autre fiche, aucune analogie n'était proposée ; dans 2 fiches, on parlait de solides pulvérisés, mais cette analogie était présentée d'une façon théorique et aucun transfert du domaine de référence au domaine cible n'était planifié.

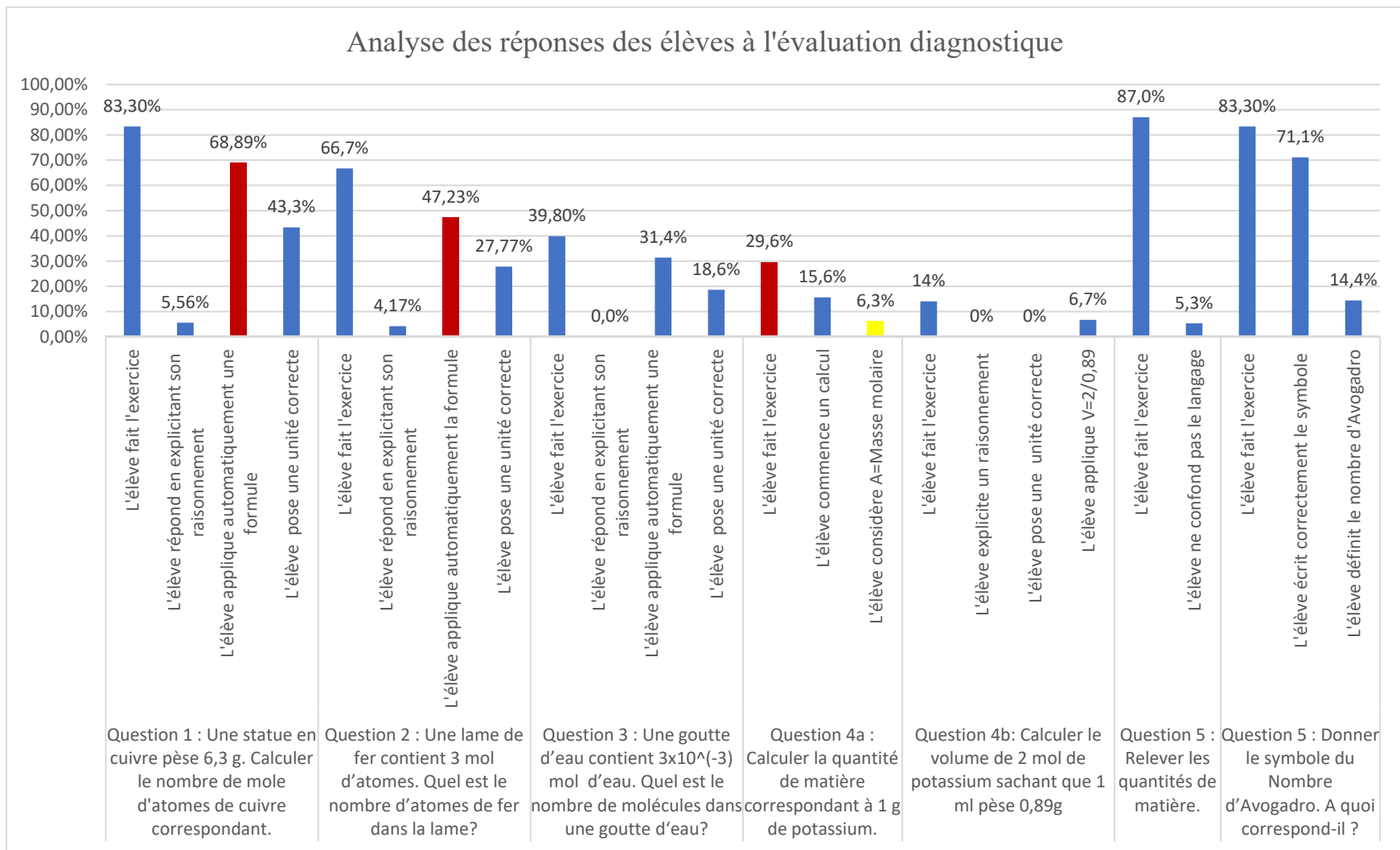
Des erreurs sémantiques se sont glissées dans les préparations soumises. Par exemple : concepts manquants (une mole de carbone ; une mole d'azote, une mole de X) ; incohérence (les symboles m et n ne sont pas présentés ; les unités manquent; on donne un exemple avec une masse en Kg ; on montre que la masse molaire est A en g/mol) ; expressions inappropriées (on réduit le concept à une seule entité, comme dans l'énoncé « une mole contient $6,023 \times 10^{23}$ atomes » ; on associe la masse à la taille).

Dans l'une des fiches, l'enseignante a prévu présenter le concept à l'aide d'une vidéo, mais cette vidéo comporte des erreurs sémantiques et une erreur dans la définition de la mole (« C'est un nombre spécifique ... utilisé en chimie pour représenter des atomes ou des molécules ; terme pratique pour représenter les nombres importants. ») Les exemples proposés étaient une initiation à l'application algorithmique des formules. Dans ces fiches, le sous-microscopique, et par la suite le lien entre le sous-microscopique et le macroscopique, n'étaient pas considérés. Autrement dit, l'aspect qualitatif du concept n'était pas développé. Par contre, l'aspect quantitatif était bien développé, mais selon une approche opératoire ; des algorithmes sont enseignés à l'élève pour garantir la réussite des calculs. L'une des enseignantes précisait que les élèves doivent « noter les relations », mais sans préciser de quoi il s'agissait.

Deux enseignantes prévoyaient une activité en sous-groupe, pour créer une interaction entre les élèves ; mais elles proposaient des tâches très simples et non un problème scientifique. Les autres enseignantes adoptaient plutôt un discours informatif.

4.3.3 L'évaluation diagnostique (Annexe 6)

Comme mentionné ci-dessus, Marthe, une des enseignante participante, a fait une évaluation diagnostique avec ses élèves de la classe de seconde à qui elle a enseigné le concept de mole l'année précédente, en EB9. Marthe a collaboré avec l'étudiante-chercheure pour construire cette évaluation diagnostique. L'étudiante-chercheure a élaboré une analyse des réponses correctes attendues et une anticipation des erreurs possibles en les reliant aux difficultés d'apprentissage répertoriées dans le cadre théorique (voir annexe 6). En effet, des difficultés d'apprentissage ont émergé de l'analyse de l'évaluation diagnostique effectuée auprès des élèves de seconde de Marthe. Tout d'abord, le nombre d'élèves qui a répondu aux exercices diminuait au fur et à mesure que les consignes devenaient plus compliquées. Ensuite, une grande majorité des élèves ont écrit des formules et ont fait des calculs, mais sans tenir compte des unités, surtout dans la valeur finale. Dans ces exercices, l'identification de l'entité chimique (atomes, molécules, etc.) ou l'utilisation de l'expression « quantité de matière » semblaient rendre les questions plus difficiles à comprendre pour l'élève. L'application mécanique des formules se manifestait dans l'exercice 4b : la plupart des élèves qui ont répondu (14% des élèves ont répondu à cette question) confondaient les différentes variables et appliquaient une formule regroupant toutes les valeurs données. La complexité de l'expression « quantité de matière » (question 5) et les confusions linguistiques (question 5b) ont émergées chez 94,7% des élèves qui ont répondu (87% des élèves ont répondu à cette question). Ces élèves ont confondu les termes mole, molécule et mL. Le problème posé par la définition du nombre d'Avogadro était flagrant, parce qu'il n'y a que 14,4% des élèves qui ont répondu (83,3% des élèves ont répondu à cette question) qui en ont donné une définition correcte. Un plus grand nombre d'élève a pu écrire correctement le symbole du nombre d'Avogadro, mais sans toutefois savoir le définir.



Histogramme 2 : Les résultats de l'analyse des réponses des élèves à l'évaluation diagnostique.

4.4 Les résultats des trois mésocycles visant la conception et l'amélioration du matériel didactique

4.4.1 Les résultats du mésocycle (2) : Conception du matériel didactique

Le mésocycle (2) a commencé par un retour sur les résultats du mésocycle (1) présentés ci-dessus : l'étudiante-chercheuse a présenté ces résultats aux enseignantes en mettant l'accent sur l'importance du concept de mole dans la progression des apprentissages en chimie et les difficultés d'apprentissage des élèves. Puis, un microcycle de conception du matériel didactique a débuté par une activité de perfectionnement portant sur les difficultés d'enseignement et d'apprentissage en sciences, et plus particulièrement en chimie, les conceptions et les obstacles didactiques relatifs au concept de mole, l'évolution socio-historique du concept de mole et les critères d'une bonne analogie. Ensuite, les six enseignantes participantes ont conçu la première version de la séquence d'enseignement (Annexe 9). Cette séquence comporte diverses activités construites en se basant sur les principaux aspects de la définition officielle.

Après mure réflexion et de nombreux échanges avec l'étudiante-chercheuse, les enseignantes ont d'abord conçu deux activités durant lesquelles l'élève doit 1) regrouper un nombre énorme de grains de sucre et 2) regrouper un nombre énorme de grains de poivre blanc. L'élève disposera de matériel (une balance, des cylindres gradués, des béchers, une spatule, un verre de montre, des sacs). L'élève réalisera qu'il ne peut pas déterminer la masse d'un grain et demandera la masse d'une certaine quantité (comme celle des sacs achetés à l'épicerie). De leur côté, les enseignantes ont déterminé la masse de 150000 grains de chaque solide pulvérisé. À noter que le nombre 150000 est présenté aux élèves sous la forme d'un exposant ($1,5 \times 10^5$). L'élève réalisera son groupement.

La troisième activité propose le calcul de la masse d'un sac contenant $1,5 \times 10^5$ grains de sel à partir d'une masse donnée et d'un nombre de grains.

La quatrième activité consiste à donner le nom d'une personne au nombre $1,5 \times 10^5$ et à donner un nom au groupement de $1,5 \times 10^5$, sachant que ce groupement ne sera pas limité à des grains de matière.

Durant la cinquième activité, les élèves doivent effectuer des calculs et répondre à un « texte à trous » (texte avec des mots ou des valeurs qui manquent) en utilisant les noms choisis, le nombre $1,5 \times 10^5$ et des variables physiques.

Dans une sixième activité, l'enseignante présente l'animation *The Scale of the Universe* en créant des liens entre la structure de la matière à l'échelle macroscopique et sa structure à l'échelle sous-microscopique. Elle fait le transfert du domaine de référence au domaine cible en présentant quelques mots, expressions et définitions de la chimie.

La séance se termine par une septième activité qui consiste à compléter un autre « texte à trous » portant sur le domaine cible. Ce texte est semblable au précédent mais, cette fois, l'élève doit se servir du langage chimique. (Durant les séances suivantes, les élèves auront à réinvestir ce langage dans diverses tâches à l'écrit.)

L'analogie du nombre énorme de grains semble être satisfaisante puisque les ressemblances entre le domaine de référence et le domaine cible sont nombreuses. Le tableau 8 présente ces ressemblances.

Toutefois, l'analogie possède ses limites telles que : l'élève doit être encadré pour ne pas transposer l'image d'un sac à l'échelle sous-microscopique ; les entités chimiques ne sont pas nécessairement un ensemble de grains dispersées et peuvent former une structure (exemple : un cristal).

La séquence d'enseignement proposée semble être adéquate pour un enseignement de la modélisation mathématique. L'élève doit raisonner et appliquer la loi de proportionnalité en dressant un tableau où les variables (masse, volume, nombre, etc.) sont spécifiées. Les formules ne sont introduites que plus tard, et seulement en conclusion à son travail. Les enseignantes ont encadré les élèves durant la phase d'investissement pour les orienter à rédiger le tableau de proportionnalité et les formules.

Après la rencontre, Élise et Joëlle ont animé la séquence dans leur classe. Elles ont fait l'évaluation, l'ont corrigée et ont partagé les résultats avec l'étudiante-chercheuse afin de les analyser. Avant de commencer le mésocycle (3), Élise et Joëlle ont présenté ce qu'elles ont vécu en classe²⁹.

²⁹ Le verbatim des échanges avec les enseignantes a été analysé à l'aide du logiciel *QDA Miner*. Les résultats de cette analyse sont présentés plus loin.

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} (valeur approximative utilisée dans les manuels).
Un nombre élevé de grains qu'on peut prendre une poignée. L'élève ne doit pas dénombrer les grains.	Le besoin de regroupement. (volet conceptuel et volet quantitatif)	Un nombre élevé d'atomes qui n'est pas dénombrable et qui se retrouve dans une quantité relativement petite à l'échelle macroscopique.
L'utilisation d'un nom pour le nombre $1,5 \times 10^{23}$ et un autre pour le regroupement et la familiarisation avec l'utilisation de ces noms pour effectuer des calculs.	Le nom d'un nombre qui se distingue du nom du nombre du regroupement.	Le nombre d'Avogadro est un nombre associé à une personne. La mole, est le nom du regroupement. Ces deux termes sont utilisés dans toutes les consignes.
Le regroupement ne peut pas être déterminé d'une façon directe ou en utilisant un instrument de mesure. Il faut le calculer à partir d'une constante physique mesurable par des instruments. Dans la version finale, l'élève calcule un nombre de regroupements à partir d'une masse et d'un volume.	Les aspects nombre et masse.	Le regroupement en mole ne peut pas être déterminé d'une façon directe ou en utilisant un instrument de mesure. Il faut le calculer à partir d'une propriété physique (la masse ou le volume) mesurable par des instruments.
Durant les activités proposées, l'élève obtiendra des nombres décimaux comme 12,65 sacs.	Une quantité en mole peut être fractionnée.	Dans un calcul, l'élève pourra obtenir une réponse en nombre décimal.

Tableau 7 : Les ressemblances entre le domaine de référence et le domaine cible de l'analogie utilisée.

4.4.2 Les résultats du mésocycle (3) : Amélioration du matériel didactique

Joëlle a expliqué qu'au début de la première séance elle se sentait un peu inquiète, d'abord parce que c'était la première fois qu'elle mettait en pratique les acquis d'une formation

continue dans sa classe et aussi parce que ses élèves ne s'étaient jamais encore servis du matériel d'un laboratoire de chimie. Elle a dû les préparer à la séquence en les familiarisant avec l'utilisation d'une balance de précision et de certaines verreries. Selon Joëlle, l'engagement des élèves dans la tâche l'a aidée à surmonter son inquiétude. Elle a décrit la motivation des élèves à manipuler, résoudre et modéliser. Joëlle a réussi à présenter les deux domaines du savoir en chimie, mais elle a trouvé difficile de créer le lien entre eux. Le plus remarquable a été un changement dans les représentations de Joëlle au sujet de l'enseignement et l'apprentissage du concept de mole : durant le groupe de discussion, Joëlle avait expliqué qu'elle enseignait le concept de mole de façon traditionnelle et que son enseignement était efficace puisque ses élèves étaient capables d'effectuer des exercices comportant des calculs. Après son expérimentation, elle a reconnu que la réussite de ses élèves à des exercices de type algorithmique n'était pas nécessairement un indicateur d'apprentissage efficace puisqu'en encadrant les élèves dans leurs démarches, elle avait mieux compris leur façon de travailler. Elle a identifié les difficultés de deux élèves (parmi 9) à construire des processus cognitifs adéquats dans la résolution de problèmes, alors que ces deux élèves, a-t-elle dit, auraient pu lui donner de bonnes réponses, lors d'un examen en appliquant des formules de façon automatique. Elle s'est aussi rendu compte que les erreurs linguistiques des élèves pouvaient être dues à ses pratiques (« Je crois que j'en suis responsable puisque qu'il s'agit d'erreurs qui découlent de mon travail en classe avec eux. »).

Élise avait aussi des inquiétudes, parce que ses élèves sont classés « faibles » et sont orientés vers des filières techniques. Elle a été agréablement surprise par l'investissement de ses élèves dans les activités. Leur intérêt pour les activités, leur engagement et leur enthousiasme à manipuler étaient, selon elle, inattendus. Elle a dit avoir réalisé que ses élèves ont une intelligence kinesthésique qui n'est pas exploitée dans des cours de type magistral. Elle a été étonnée que ses élèves manifestent des attitudes et des habiletés telles qu'essayer de peser un grain, se rendre compte de sa masse négligeable, peser un ensemble de grains et chercher la masse d'une certaine quantité, etc. Elle a toutefois été déçue que l'enthousiasme des élèves semble moins grand pour les tâches qu'ils devaient effectuer sur papier.

Les deux enseignantes ont signalé l'absence de manipulation reliant le volume à la quantité de matière. Selon elles, ce genre de manipulations pourrait aider l'élève à surmonter la confusion langagière entre mL et mol. Aussi, elles se sont aussi demandées comment vérifier si

l'élève distingue le domaine microscopique du domaine macroscopique. Elles ont proposé l'ajout d'exercices de modélisation, sur ce sujet, dans la séquence d'enseignement et dans les évaluations.

Les enseignantes ont aussi parlé des résultats des évaluations. Dans le cadre de la nouvelle séquence, les élèves ont manifesté une préférence pour effectuer un calcul en expliquant leur raisonnement de proportionnalité plutôt que de simplement appliquer des formules³⁰. Toutefois, des confusions langagières étaient toujours présentes.

Après l'échange avec Élise et Joëlle, l'étudiante-chercheuse a animé une activité de perfectionnement portant sur le langage et l'évitement des erreurs sémantiques. Enfin, les participantes ont révisé la séquence qu'elles avaient construite en tenant compte des améliorations proposées par Élise et Joëlle et du contenu de la formation. Ainsi, une activité au cours de laquelle l'élève calcule une quantité de sucre à partir d'un volume mesuré a été ajoutée, d'autres exercices de manipulation ont été prévus, et des questions portant sur la modélisation ont été ajoutées à l'évaluation. Les enseignantes ont intégré des acquis de formations didactiques antérieures à la recherche : elles ont construit des activités en intégrant plus de techniques de gestion d'équipes comme le *Philips* et le *Jigsaw*. Ces techniques facilitent la gestion de grands groupes et la gestion du temps en favorisant l'interaction et l'engagement des élèves.

Le mésocycle (3) s'est poursuivi avec la mise à l'essai de la séquence par Cynthia et Aya dans leur classe. Les résultats de l'évaluation étaient aussi plus satisfaisants quant au développement de schèmes cognitifs puisque les élèves n'ont pas appliqué des algorithmes de façon automatique dans la résolution des tâches complexes proposées. Par contre, la confusion due à l'expression « quantité de matière » est restée problématique. Les enseignantes se sont montrées très intéressées à connaître le résultat de l'exercice « grain de sable » où les élèves devaient décrire (par dessin ou par texte) ce qu'ils observeraient en regardant un grain de sable à l'aide d'un puissant microscope. Les enseignantes étaient curieuses de savoir si les élèves ont saisi la discontinuité de la matière à l'échelle sous-microscopique. Dans leur production, presque 60% des élèves ont distingué le domaine microscopique du domaine macroscopique et

³⁰ Les résultats des analyses des évaluations des élèves au cours du cycle de DBR sont présentés vers la fin de la section 4.5.

ont utilisé correctement les termes atomes et molécules. Cela dit, seulement 21 % des élèves ont ajouté le mot « mol » à leur production écrite.

4.4.3 Les résultats du mésocycle (4) : Suite de l'amélioration du matériel didactique

Le mésocycle (4) a commencé par le retour réflexif de Cynthia et Aya. Leurs propos semblaient rassurants quant au contenu de la séquence.

Les résultats des élèves étaient satisfaisants, mais le principal inconvénient était la durée de la séquence qui posait problème en raison de l'échéance rapprochée de l'examen officiel. Malgré tout, les enseignantes ont décidé de garder la même version, puisqu'elles appréciaient son efficacité, mais avaient l'intention de proposer aux élèves de travailler en équipe, une consigne qu'elles ont ajoutée à la séquence.

Concernant le retour sur leur gestion de classe, les deux enseignantes étaient inquiètes au début de la première séance. (« Nous étions nous-mêmes stressées. »). En effet, comme le nombre d'élèves dans leur classe était relativement élevé, elles craignaient que la gestion d'élèves qui doivent effectuer des manipulations soit plus difficile. Les deux enseignantes ont noté que la première activité a duré plus longtemps que prévu mais ont eu l'impression que les élèves ont construit un schème cognitif qui leur a permis de poursuivre un apprentissage plus efficace. Les deux enseignantes ont reconnu les bienfaits de l'animation *The Scale of the Universe* pour créer des liens entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique. Une des enseignantes a remarqué une difficulté chez certains élèves dans le transfert du domaine de référence au domaine cible. Par exemple, un des élèves lui a demandé si les entités chimiques étaient vraiment regroupées dans des sacs! Les enseignantes pourraient tenir compte de cette limite de l'analogie en orientant certains groupes vers une autre solution : peser une même quantité de matière en se servant de divers contenants.

Durant les mésocycles précédents, l'étudiante-chercheuse a tenu à créer des liens entre les obstacles d'apprentissage et l'évolution socio-historique du concept et entre les erreurs sémantiques et l'évolution socio-historique. Les enseignantes ont manifesté un intérêt pour l'histoire de ce concept ; par exemple, elles étaient étonnées que le concept ait été défini par Ostwald, dont elles n'avaient jamais entendu parlé, et que le nombre d'Avogadro ait été découvert par Perrin ; elles étaient contentes d'en savoir plus sur le choix de l'élément carbone,

puisque les élèves ont posé des questions à ce sujet. L'étudiante-chercheuse a donc décidé que la dernière activité de perfectionnement porte sur des repères culturels en lien avec le concept. Elle a mené un débat autour d'un article³¹ qui portait sur son évolution socio-historique. L'intérêt des enseignantes était garanti puisque le sujet les intriguait. Elles ont décidé d'inclure des repères culturels pour compléter la séquence, sans toutefois inclure ces aspects dans l'évaluation.

Marthe et Joanne ont expérimenté la séquence dans leur classe. Elles ont fait l'évaluation, l'ont corrigé et ont partagé les résultats avec l'étudiante-chercheuse. Les deux enseignantes ont aussi partagé les résultats d'un exercice réalisé en classe dans lequel les élèves devaient écrire eux-mêmes la consigne d'un exercice portant sur la mole. Les résultats de l'analyse des énoncés des élèves semblent montrer que l'apprentissage a été efficace, puisque la plupart des élèves ont créé des liens entre les deux domaines, ont évité les erreurs sémantiques et ont proposé des situations de leur vie quotidienne. Le plus intéressant est que la plupart des élèves ont demandé la masse molaire à l'enseignante. Certains élèves, qui n'avaient pas compris, ont toutefois indiqué une valeur choisie au hasard.

Dans ce qui suit, une analyse des verbatim des retours réflexifs des enseignantes, une présentation des résultats des élèves à l'exercice « le grain de sable », et la construction d'un problème sont présentés.

4.4.4 Le retour réflexif des enseignantes

Afin de mieux analyser le retour réflexif des enseignantes et d'identifier s'il s'est produit une évolution des connaissances professionnelles des enseignantes, les commentaires des enseignantes ont été transcrits et analysés à l'aide du logiciel *QDA Miner*. Le tableau 9 montre les catégories et les sous-catégories qui ont émergé de cette analyse.

³¹ Padilla, K et Furió-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 and Education*, 17 (4), 403-424.

Catégorie	Sous-catégorie	Pourcentage de cas
Retour sur les pratiques en classe	Intervention par défi	100%
	Gestion de temps	100%
	Gestion de classe	60%
Efficacité de l'apprentissage	Développement pertinent du concept	100%
	Développement des habiletés	100%
	Développement des attitudes	80%
	Difficultés persistantes	40%

Tableau 8 : Les catégories et les codes de l'analyse qualitative des retours des enseignantes

Les catégories et les sous-catégories ont été déterminés à partir des propos des enseignantes. Chacune des 6 enseignantes a commencé par décrire la séquence en voyant un défi proposé aux élèves et par mentionner la gestion de temps qui variait selon les activités. Certaines ont voulu parlé de la technique de gestion de classe par équipes. Les 6 enseignantes se sont attardés sur l'acquisition du concept en la comparant avec celle des années précédentes et sur l'investissement des élèves dans la tâche. Par ailleurs, elles ont énuméré des difficultés persistantes éprouvées lors des activités animées en classe ou des évaluations.

Comme le montrent le dendrogramme 1 et la matrice des fréquences 1, le retour réflexif des enseignantes a surtout porté sur l'efficacité observée des apprentissages.

Les enseignantes se sentaient, sans exception, stressées au début de la première séance. Elles craignaient que les élèves ne s'impliquent pas et ne s'engagent pas dans le défi proposé. La motivation des élèves les a aidées à surmonter leur crainte d'un changement dans leur pratique.

Elles ont observé le développement d'habiletés scientifiques telles qu'essayer de peser un grain, ou demander la masse d'un groupement de grains, et d'attitudes scientifiques telles que travailler avec précision et minutie pour obtenir les résultats. (« Les élèves étaient très concentrés et très motivés. » « Tous les groupes voulaient savoir quel était la masse d'un grain. » « Les élèves ont remarqué les moindres détails. »). Elles ont aussi constaté le développement de connaissances relatives au concept (la relation entre la masse et le nombre de mole, la définition de la mole, le but du regroupement dans ce concept, etc.).

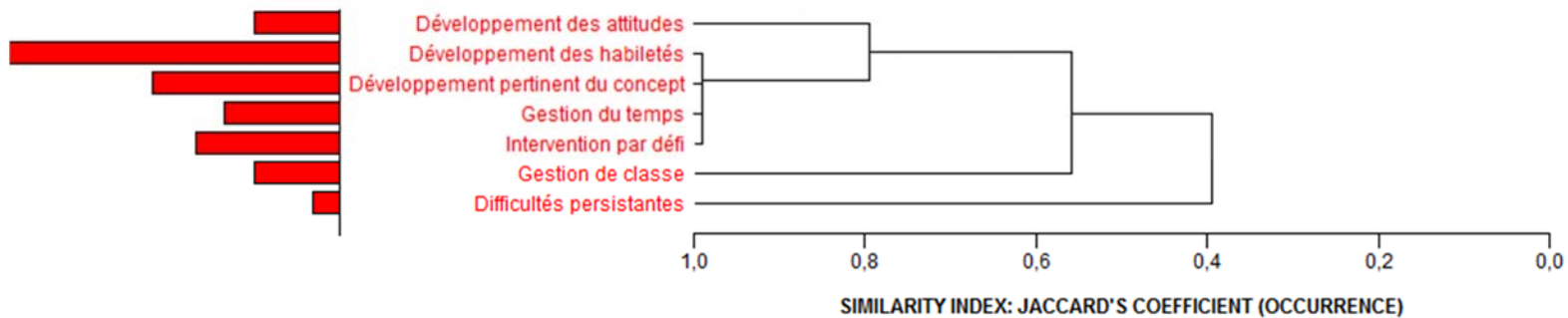
Les enseignantes ont apprécié faire apprendre les sciences en proposant des défis que les élèves pouvaient surmonter en manipulant (« Ils ont besoin d'un support concret. » « La manipulation a facilité l'acquisition. »). Elles ont remarqué une meilleure acquisition du concept

de mole et la création de liens entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique (« Les élèves ont pu faire le lien entre le sous-microscopique et le macroscopique. »). Comme le montre le tableau 9, ces sous-catégories ont été repérées dans le discours de toutes les enseignantes et, d'après le dendrogramme et la matrice, ces sous-catégories représentent des idées récurrentes.

Selon les enseignantes, il semble que l'intervention par défi a été efficace non seulement pour aider les élèves à construire le concept scientifique de mole, pour développer des attitudes et des habiletés scientifiques, mais aussi – et contrairement à ce qu'elles craignaient – pour favoriser une meilleure gestion de la classe.

Les enseignantes ont aussi parlé de la gestion de temps. Elles ont surtout remarqué que les élèves ont pris leur temps pour résoudre le premier défi, mais que les autres défis, reliés au premier, étaient plus faciles à résoudre (« La réalisation des activités 1 et 2 était plus rapide que celle de l'activité 1, parce que les élèves avaient compris le principe. »).

Cela dit, l'acquisition n'a pas été parfaite pour tous les élèves. Tel que mentionné, une des enseignantes a noté la difficulté vécue par certains de ses élèves à créer le pont entre le domaine de référence de l'analogie et le domaine cible. D'autres enseignantes ont identifié des difficultés persistantes : des difficultés dues aux mathématiques (« Ils n'ont pas compris 12,65 sacs. »), des confusions linguistiques telle que la différence entre mole et mol (« Les élèves éprouvaient des difficultés à se servir des symboles et préféraient ne pas en tenir compte dans les calculs de proportionnalité »).



Dendrogramme 1 : Co-occurrence des sous-catégories de l'analyse des retours réflexifs des enseignantes au début de chaque mésocycle.

	Développement des attitudes	Développement des habiletés	Développement pertinent du concept	Difficultés persistantes	Gestion de classe	Gestion du temps	Intervention par défi
Développement des attitudes	1	0,8	0,8	0,5	0,4	0,8	0,8
Développement des habiletés	0,8	1	1	0,4	0,6	1	1
Développement pertinent du concept	0,8	1	1	0,4	0,6	1	1
Difficultés persistantes	0,5	0,4	0,4	1	0,25	0,4	0,4
Gestion de classe	0,4	0,6	0,6	0,25	1	0,6	0,6
Gestion du temps	0,8	1	1	0,4	0,6	1	1
Intervention par défi	0,8	1	1	0,4	0,6	1	1

Matrice des fréquences 1 : Matrice des fréquences des sous-catégories de l'analyse des retours réflexifs des enseignantes au début de chaque mésocycle.

4.4.5 Les résultats des élèves

Le certificat d'éthique de la présente recherche permettait d'analyser les réponses des élèves à des évaluations que l'enseignante a l'habitude de faire (évaluation diagnostique, évaluation formative, etc.). Les objectifs de l'analyse des réponses des élèves étaient de : 1) vérifier si les élèves font plus qu'appliquer des algorithmes de façon purement automatique et expliquent leurs calculs ; 2) vérifier si les élèves distinguent le domaine sous-microscopique du domaine macroscopique ; 3) vérifier si les confusions linguistiques semblent dissipées.

Les résultats des élèves³² semblent confirmer un apprentissage efficace puisque le nombre d'élèves répondant aux questions a augmenté au cours du cycle du DBR et leurs réponses semblent également indiquer la présence de schèmes cognitifs pertinents.

L'analyse a d'abord porté sur la capacité de l'élève à calculer une quantité de matière en explicitant son raisonnement et en distinguant les variables. Les histogrammes 4, 5 et 6, montrent que la proportion d'élèves qui explicite son raisonnement a augmenté au cours du cycle du DBR. Nous entendons par « expliciter son raisonnement » le fait que l'élève ait tracé un tableau de proportionnalité où il a consigné les variables correctement avant de poser la formule. La proportion d'élèves qui ont réussi à poser une unité correcte a aussi augmenté. Dans les trois graphiques, on constate une brusque augmentation entre les résultats de l'évaluation diagnostique qui a eu lieu au mésocycle 1 et ceux de l'évaluation qui a eu lieu au mésocycle 2, ce qui semble indiquer que les manipulations favorisent la construction de schèmes cognitifs pertinents.

La résolution des problèmes n'était plus l'application automatique d'un algorithme en combinant les nombres disponibles au hasard des unités. Les résultats de ces histogrammes montrent aussi que les élèves distinguaient mieux la mole de la molécule. Toutefois, les élèves indiquaient assez rarement une unité en plus de la valeur numérique de leur réponse.

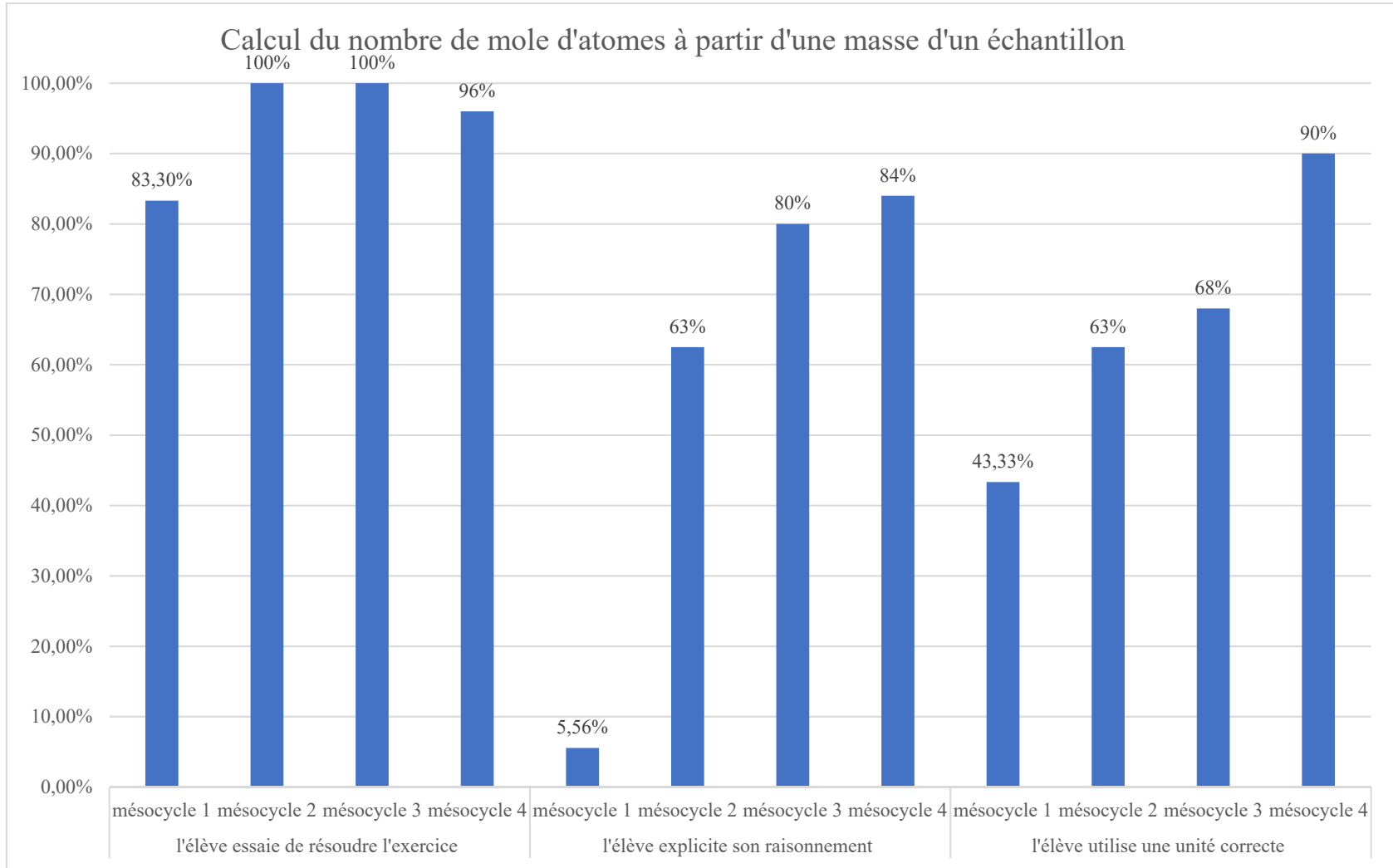
L'histogramme 7 montre les résultats de l'analyse des réponses des élèves à une tâche complexe. Ils devaient calculer une quantité de matière à partir d'un volume. Sur ces graphiques, un saut de valeurs est noté entre le mésocycle 2 et le mésocycle 3. En fait, les enseignantes Élise et Joëlle auraient souhaité mieux travailler le processus cognitif permettant de calculer une

³² Dans tous les histogrammes, une première colonne montre le pourcentage d'élèves qui ont répondu à la question. Les autres variables sont calculées par rapport à ce pourcentage. Par exemple, dans l'histogramme 4, au prétest 5,56% des élèves qui ont répondu à la question (soit 83,3% des élèves) ont explicité leur raisonnement.

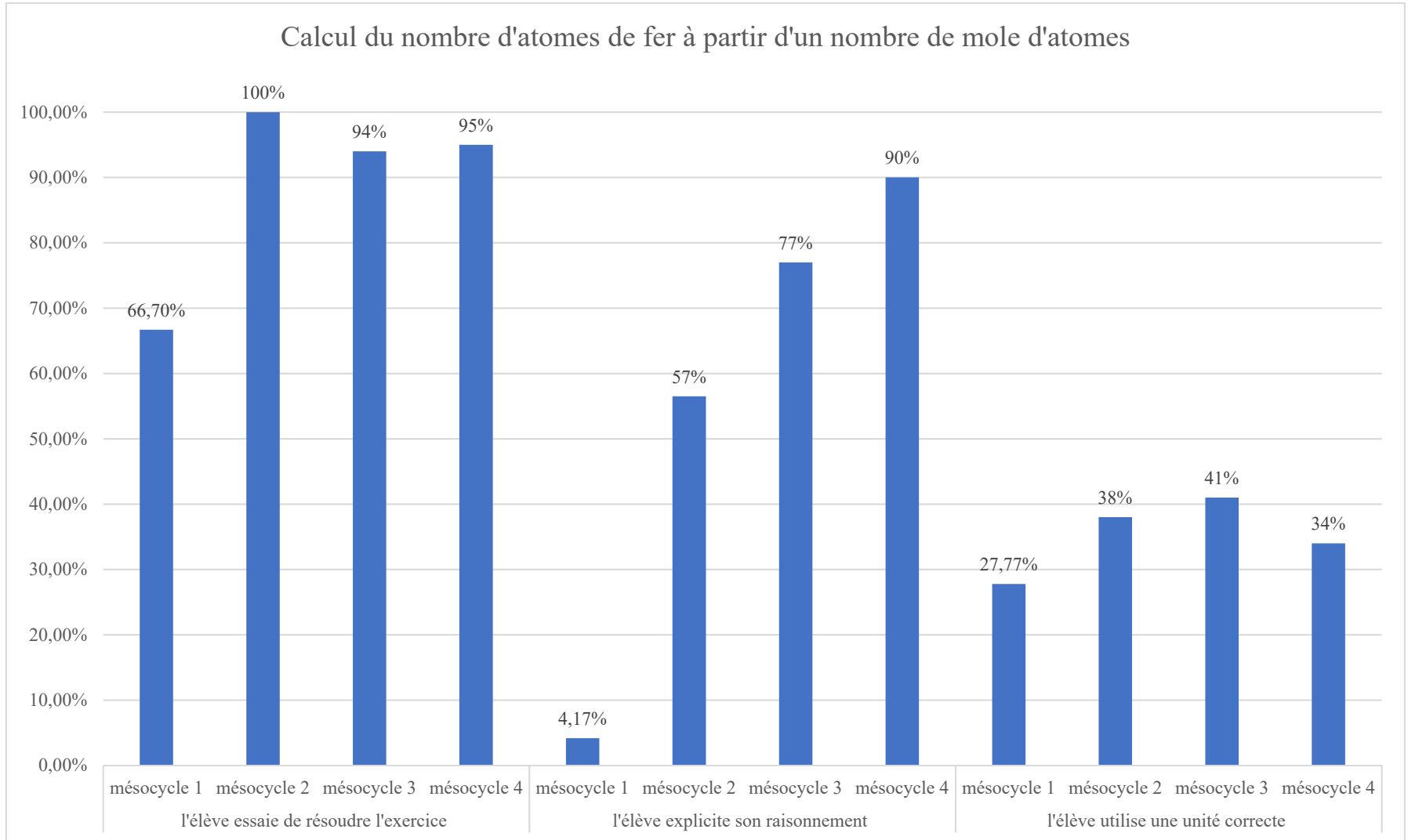
quantité de matière à partir d'un volume car elles avaient remarqué les lacunes des élèves dans ce genre d'exercices. Les enseignantes participantes ont ajouté des activités pratiques et théoriques dans lesquelles l'élève déterminait une quantité de matière à partir d'un volume. Les améliorations apportées à la séquence au début du mésocycle 3 ont semblé avoir porté fruit puisque la plupart des élèves ont réussi à le faire.

L'histogramme 8 montre les résultats de l'analyse d'un exercice dans lequel l'élève devait choisir, dans un texte, des quantités de matière. Les résultats ne sont pas satisfaisants puisque seule une minorité des élèves entendait, par quantité de matière, une quantité dont l'unité est la mole. Cela dit, ce n'est pas très surprenant, parce que les élèves apprennent en physique que la masse est une quantité de matière !

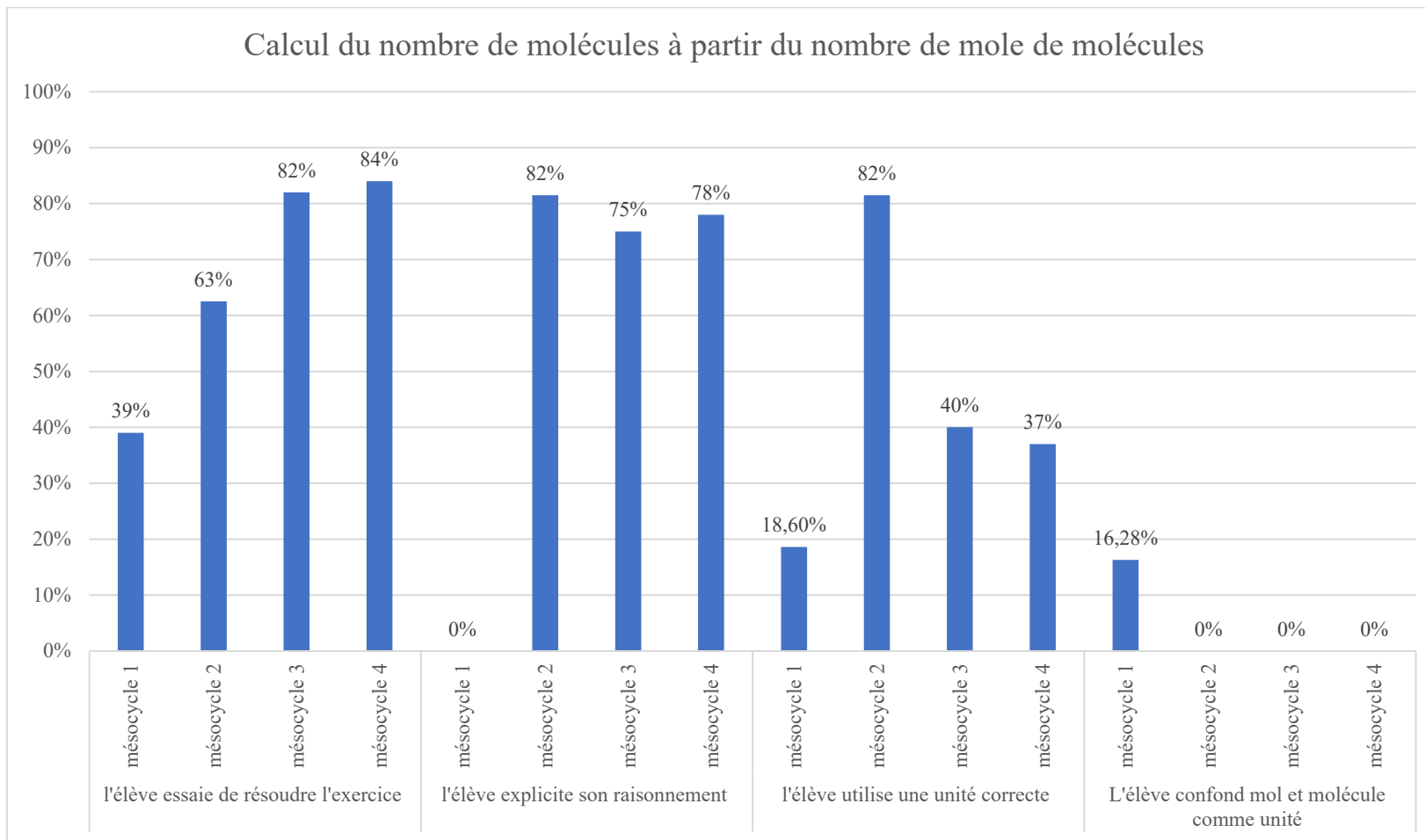
Les résultats des élèves, dans la résolution de tâches simples ou complexes, sont plutôt satisfaisants et semblent confirmer que l'enseignement était efficace. L'évolution des connaissances relatives au concept de mole semble avoir favorisé une évolution des conceptions des élèves (Gauthier, 1998). L'évaluation de la compréhension, par les élèves, des domaines sous-microscopique et macroscopique, l'évaluation de leur langage scientifique, et leur appropriation du concept de mole sont présentées ci-dessous.



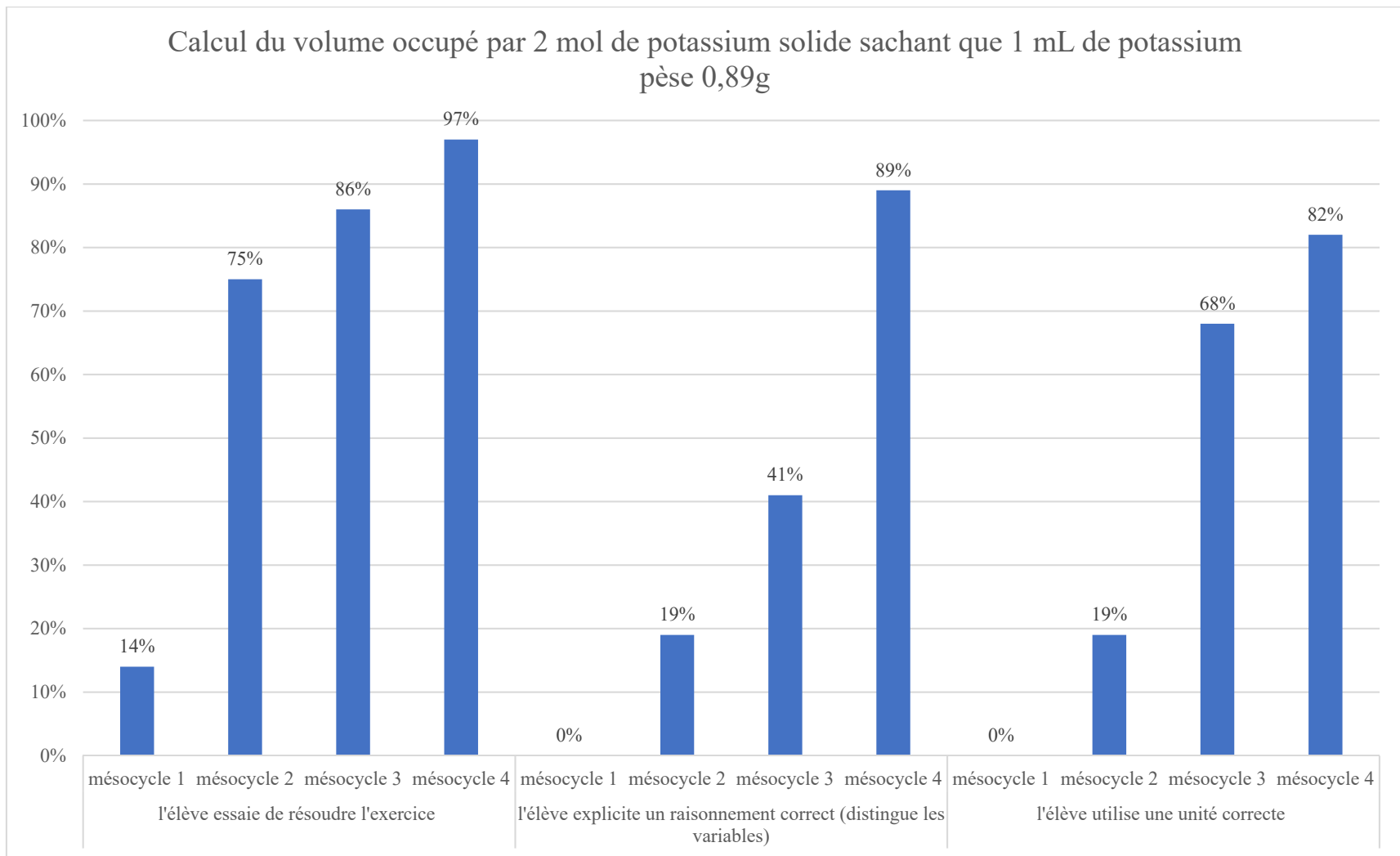
Histogramme 3 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour le calcul de nombre en mole à partir d'une masse d'un échantillon



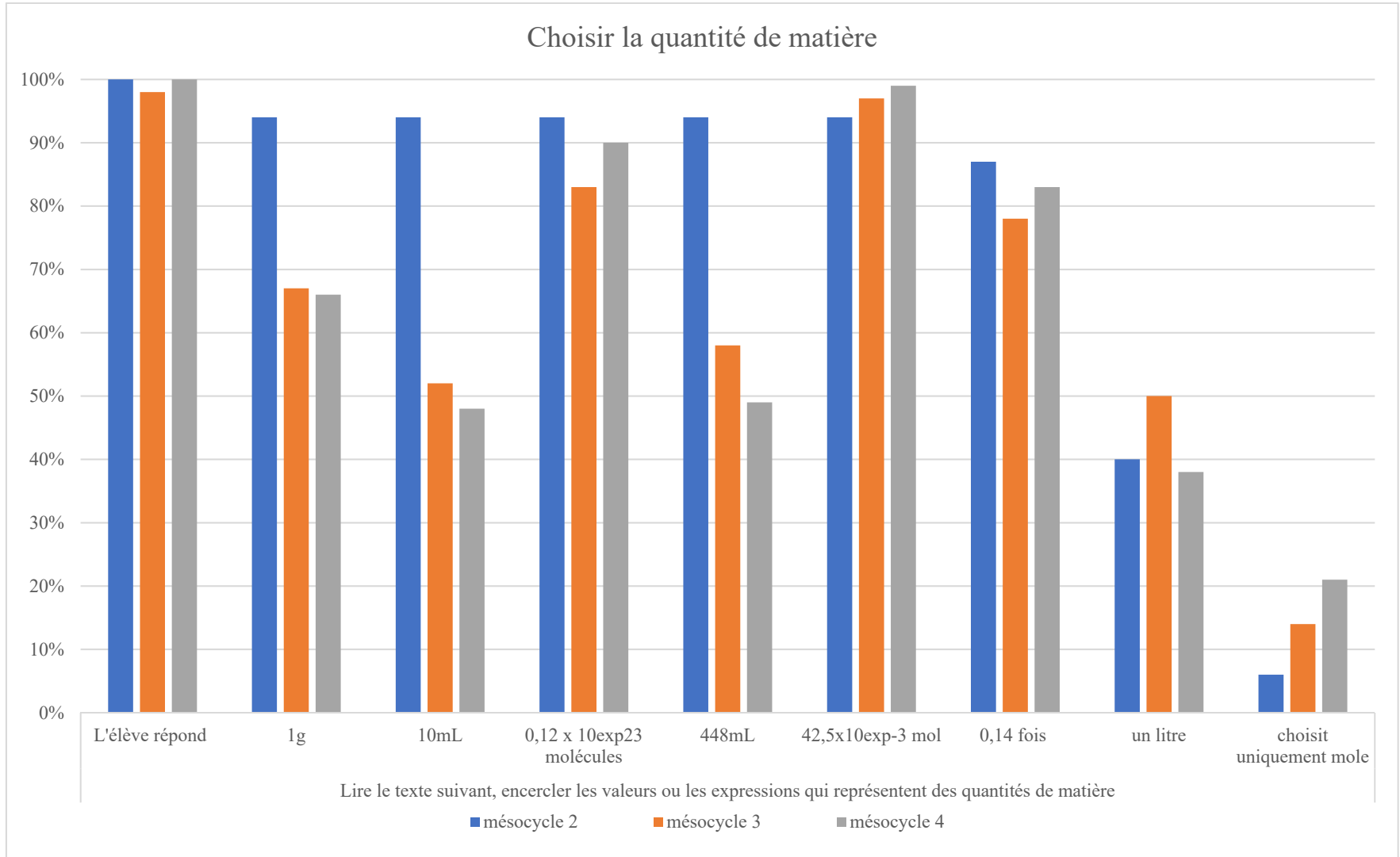
Histogramme 4 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour le calcul de nombre d'atomes à partir d'un nombre en mole d'atomes



Histogramme 5 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour le calcul de nombre de molécules à partir d'un nombre en mole de molécules.



Histogramme 6 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR pour la résolution d'une tâche complexe



Histogramme 7 : Variation des résultats des élèves au cours du cycle de DBR sur les confusions langagières du concept « quantité de matière ».

En ce qui concerne les évaluations formatives, deux évaluations ont été conçues par les participantes : « Le grain de sable » (mésocycle 3) et « Construire un énoncé » (mésocycle 4).

Les élèves devaient représenter ce qu'ils pourraient voir en regardant un grain de sable à l'aide d'un appareil optique ultra puissant. Dans les productions des élèves on s'intéressait surtout à la distinction entre le domaine macroscopique et sous-microscopique, la discontinuité de la matière au niveau sous-microscopique et l'utilisation de termes comme entités, molécules, atomes plutôt que grain de sable. Les résultats des analyses de leur réponse (voir Histogramme 8) semblent indiquer que les élèves ont distingué le domaine macroscopique du domaine sous-microscopique. Ils ont reconnu que la matière n'est pas continue et que ce qui est observable à l'échelle macroscopique n'est pas identique à la structure sous-microscopique. En fait, les élèves se représentaient le grain (échelle macroscopique) et distinguent des entités (certains élèves les nommaient atomes, d'autres les nommaient molécules). Des élèves ont représenté ces entités dans des regroupements correspondant au nombre d'Avogadro. Toutefois, certains élèves ont écrit à côté du grain de sable « 1 mole », sans aucun signe ; un seul élève a clairement mis le signe égal (=). Toutefois, il est difficile de savoir si les élèves ont considéré le grain de sable comme une mole, ou s'ils voulaient représenter une mole, puisqu'ils ont dessiné un groupement de N_A entités (ce qui correspond à une mole) sans plus de précision. La plupart des élèves ont représenté leur regroupement selon les conventions mathématiques (en encerclant le groupement) ou selon une forme de grain. Aucune annotation de « sac » n'a été repérée.

Cela dit, il est impossible de confirmer que le transfert du domaine de référence au domaine cible a été parfaitement réussi et que l'élève a reconnu les limites de l'analogie. En effet, le certificat d'éthique (Annexe 1) de la présente recherche ne permettait pas de mener des entretiens d'explicitation avec les élèves ou de leur faire passer des tests autres que ceux dont les enseignantes se servaient dans leur enseignement habituel. Certains schémas produits par les élèves se retrouvent à la figure 13.

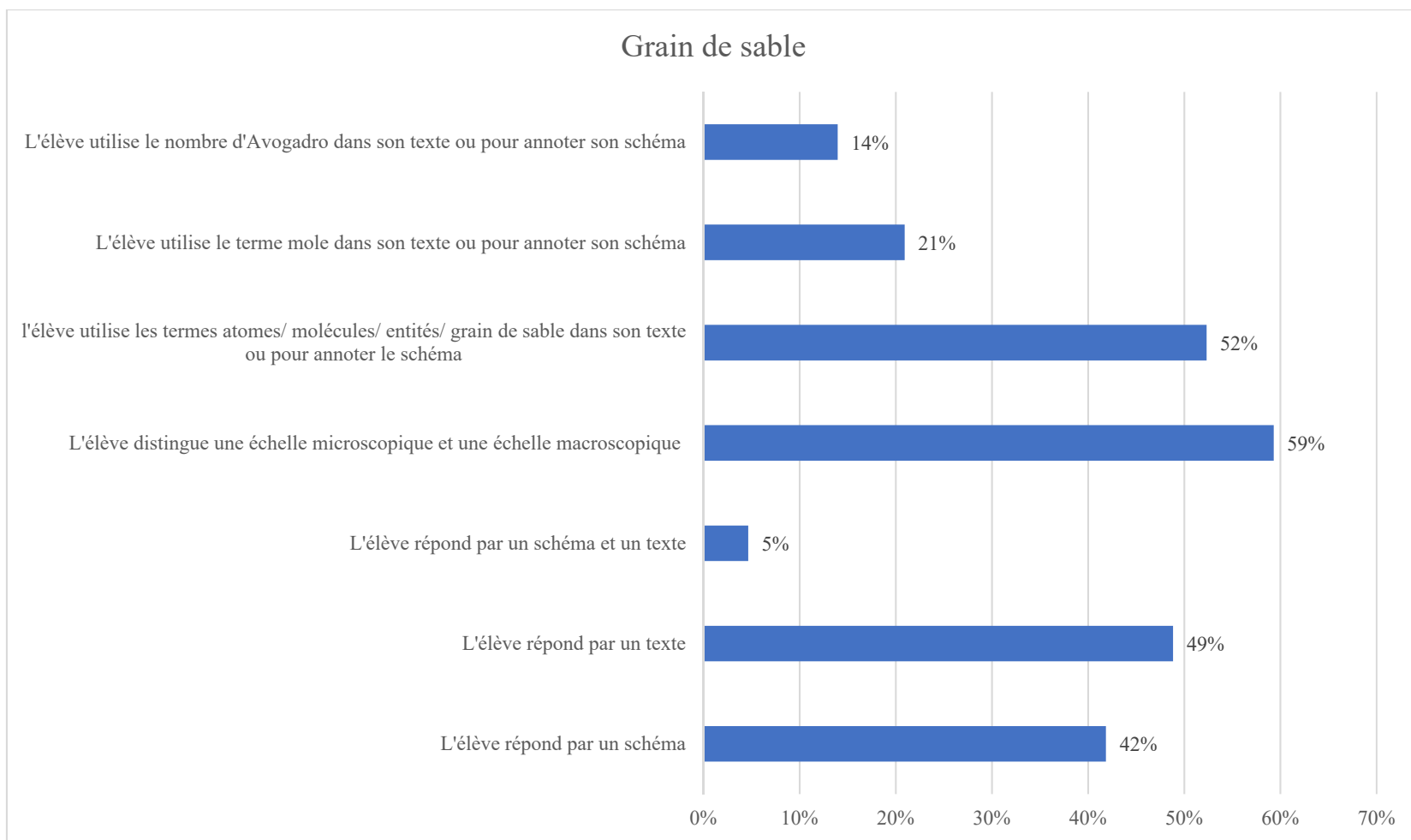
Durant le mésocycle 4, les enseignantes ont choisi de laisser les élèves concevoir, en équipe, leur propre énoncé d'un problème relatif au concept de mole ainsi que le corrigé de cet exercice. Presque 40% des équipes ont proposé des problèmes comportant des tâches complexes. Presque 50 % ont conçu des situations en lien avec la vie quotidienne. Données assez remarquables, presque 60% des équipes ont réussi à concevoir des problèmes dans lesquels 1) il n'y n'avait pas d'erreurs sémantiques 2) les domaines étaient distingués, 3) les

expressions étaient appropriées 4) les concepts étaient clairement énoncés et 5) les corrigés proposés étaient corrects.

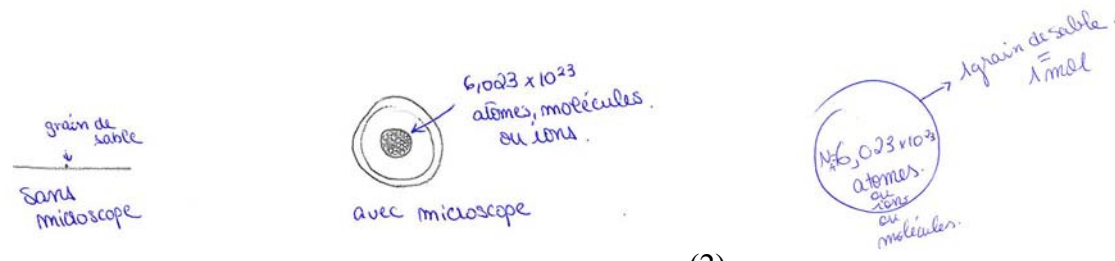
Certaines équipes ont demandé une masse molaire à l'enseignante, alors que d'autres ont proposé une valeur de leur choix. À noter que la détermination de masse molaire n'avait pas été abordée durant la séquence d'enseignement puisque qu'elle était toujours présente dans les données des problèmes. Des exemples d'énoncés sont consignés dans le tableau 10.

Les résultats de cette évaluation formative sont donc, pour l'essentiel, très positifs, mais il faut garder à l'esprit qu'il s'agissait d'un travail d'équipe. Bien que l'interaction en équipe soit de nature socio-constructiviste, qu'elle soit le lieu de conflits cognitifs intra personnels et interpersonnels et qu'elle favorise des changements conceptuels, il y aurait éventuellement avantage à faire la vérification des apprentissages des élèves, sur une base individuelle, dans un autre contexte.

Tel que mentionné au paragraphe 4.1, une équivalence dans la composition des groupes permettait, pour l'essentiel, de réduire l'effet-classe à l'effet-maitre. Autrement dit, les résultats de ces évaluations formatives montrent une efficacité des activités que les enseignantes ont construites et améliorées. En conséquence, ces résultats seront très proches des résultats qu'on obtiendrait si les groupes sont inversés.

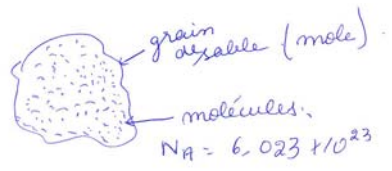


Histogramme 8 : Les résultats de l'analyse des réponses des élèves à l'exercice « le grain de sable »

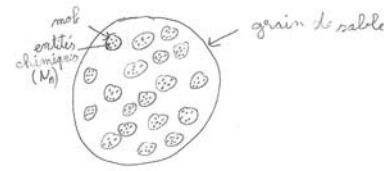


(1)

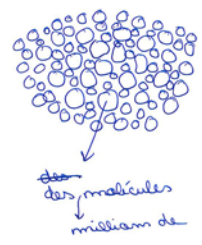
(2)



(3)

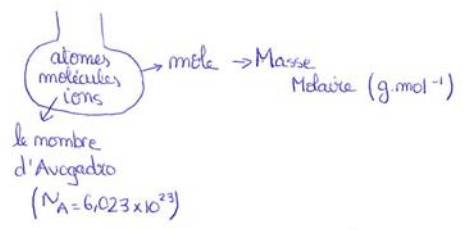


(4)



(5)

Après d'avoir approcher du microscope très puissant, de petites entités chimiques apparaissent (ions, atomes, molécules) qui représentent le nombre d'Avogadro (N_A).

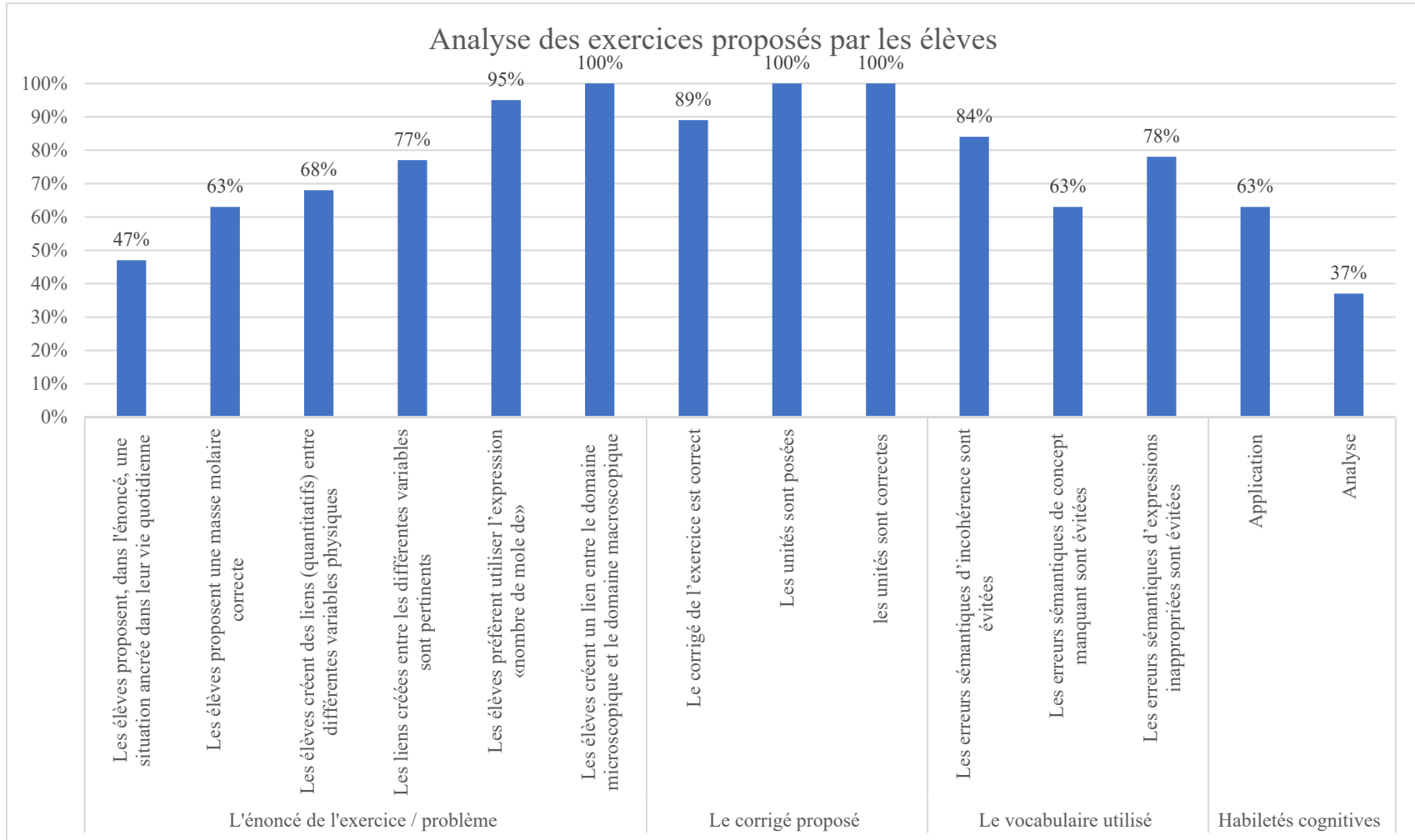


(6)

Figure 14 : Des exemples de représentations des élèves d'un grain de sable.

Caractéristiques	Énoncés	Remarques
Lien avec la biologie.	Dans chaque inspiration, l'être humain absorbe du diazote, du dioxygène et du dioxyde de carbone. Dans chaque 100 cm ³ d'air, on a 79 cm ³ de N _{2(g)} , 21 cm ³ de O _{2(g)} et 0,03 cm ³ de CO _{2(g)} . Calculer le nombre de molécules de dioxygène sachant que 1 cm ³ pèse 0,014 g. (Masse molaire de O ₂ =32 g.mol ⁻¹)	Selon leur corrigé, les élèves supposent que nous inspirons 100 cm ³ d'air à chaque inspiration.
Tâche complexe.	Un chimiste désire acheter un collier en or pour étudier ses propriétés chimiques et physiques (Au). Données : M _{molaire} = 197 g.mol ⁻¹ ; M _{volumique} = 19,3 g.mol ⁻¹ . Calculer le volume du collier sachant qu'il comporte n _{mol} 0,15 mol à une valeur approchée de 10 ⁻² près. Trouver le nombre d'atomes dans ce collier.	Les élèves confondent le symbole et l'unité de la masse volumique dans leur énoncé. Pourtant, ils utilisent le symbole correct et les unités correctes dans leur corrigé.
Vie quotidienne.	Le sel de table est extrait de l'eau de mer. On s'en sert dans la cuisine. Sachant que 15 moles de sel pèsent 250 g, trouver la masse molaire du sel. Sachant que 3 moles de sel contiennent 3,612x10 ²³ ions, quelle est la quantité de moles qui contient 2,105x10 ⁵ ions?	Les élèves ont calculé correctement le nombre d'ions en tenant compte de la formule du chlorure de sodium. Par contre, l'unité devrait être écrite « mol »
Chimie.	Une lame de métal (M) contient 1300cg/dm ³ . On la verse dans un bécher qui peut contenir 50 mL. Il contient 50 mL d'eau (<i>le bécher est rempli à ras bord</i>); l'eau se déborde dans un autre bécher et contient 20 mL (<i>20 mL sont récupérés dans l'autre bécher</i>) Calculer le nombre de mol sachant qu'une mole de ce métal pèse 600g.	Cet énoncé montre les difficultés en français de certains élèves.

Tableau 9 : Des exemples des énoncés construits par les élèves.



Histogramme 9 : Les résultats de l'analyse des énoncés construits et corrigés par les élèves

4.5 Les résultats du dernier mésocycle (fin du DBR)

Les résultats de ce dernier mésocycle ont été obtenus à l'aide d'un groupe de discussion et d'entretiens d'explicitation.

4.5.1 Le groupe de discussion

À la fin de l'expérimentation, l'étudiante-chercheure a animé un groupe de discussion pour recueillir l'opinion des participantes au sujet des effets de la formation et au sujet de leurs connaissances disciplinaires et didactiques. Ce groupe de discussion a aussi été une bonne occasion de remercier les participantes pour leur engagement.

Chacune des participantes a d'abord décrit son groupe d'élèves. Presque tous les élèves sont issus de familles plutôt défavorisées. Bien que les participantes n'aient pas mentionnées de difficultés d'apprentissage particulières (qui auraient été dépistées par un diagnostic officiel), elles ont soulevé le problème que certains élèves fréquentent des centres d'aide au devoir après l'école, ce qui peut contrecarrer le travail didactique fait en classe, parce que ces centres, qui visent d'abord le succès à court terme, mettent l'accent sur l'enseignement d'algorithmes que les élèves peuvent appliquer de façon automatique.

Les participantes ont décrit leur participation et leur expérimentation avec beaucoup d'enthousiasme. Deux des participantes ont confirmé qu'elles ont apprécié la collaboration et la coopération chercheure-enseignants durant le DBR (« Les deux catégories sont indispensables, le chercheur et l'enseignant. »). Elles ont constaté une richesse dans les échanges entre participantes à cause de la diversité des rôles de chacune, dans la recherche, et de la diversité des années d'expérience en enseignement de la chimie. Selon elles, la formation leur a permis de développer les connaissances disciplinaires et didactiques essentielles pour concevoir leur séquence.

Trois des participantes ont avoué que la formation leur a permis de beaucoup mieux comprendre le concept de mole et son évolution socio-historique, ce qui a facilité leur enseignement. Elles ont ajouté qu'elles n'avaient jamais pensé à créer un lien entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique, mais qu'elles ont réalisé que c'est un des fondements de l'enseignement de la chimie. Les trois autres participantes ont dit qu'elles

n'avaient pas elles-mêmes de difficultés à comprendre le concept mais qu'elles avaient de la difficulté à l'enseigner et n'avaient jamais pensé aux liens entre les deux domaines (« Personnellement, concernant la notion de mole, 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. » « J'ai apprécié le lien entre microscopique et macroscopique et la façon dont on peut faire le lien entre les deux; avant quand j'expliquais le concept de mole, je ne faisais pas ce lien; c'est quelque chose de nouveau que j'ai retiré de cette formation. »). Dans l'ensemble, elles ont trouvé que la formation leur a permis de se familiariser avec une nouvelle façon d'aborder l'enseignement des concepts en chimie.

Toutes les enseignantes ont noté que, suite à la formation, elles se sentaient capables de mieux critiquer les analogies usuelles et de les améliorer. Elles ont toutes manifesté leur satisfaction d'être maintenant en mesure de concrétiser un concept aussi abstrait que la mole. Au départ, elles n'auraient pas pensé que c'était possible (« Nous avons pu viser une notion complètement théorique, qui est généralement expliquée d'une façon théorique, et nous étions au laboratoire! » ; « Personne n'avait imaginé qu'on pouvait aller au laboratoire pour le concept de mole. »). Elles ont reconnu les bienfaits de la formation et du travail d'équipe sur la planification de leur séquence.

Elles ont ajouté que, dans le cadre d'un projet d'établissement (2012-2014), chaque enseignante avait été encouragée à observer, à tour de rôle, la classe et l'enseignement des autres enseignantes et que cette observation mutuelle avait fait évoluer leur PCK (*Pedagogical Content Knowledge*) (« Quand j'ai observé en classe, ça m'a beaucoup aidé à voir quelle démarche il faut suivre avec les élèves, c'était très formateur. » « En observant les classes de mes collègues, j'ai pu comparer leur façon d'enseigner avec le mienne, c'était une façon pour moi de m'auto-évaluer. »).

Toutes les participantes ont mentionné avoir remis en question certaines de leur anciennes pratiques. Elles comptent repenser leur enseignement en favorisant le travail d'équipe, en mettant en pratique les acquis de la formation (construire des analogies, revoir les erreurs sémantiques, planifier des séances d'apprentissage selon l'approche de résolution de problème, considérer les conceptions alternatives des élèves, etc.). Les participantes ont en effet l'intention, à l'avenir, de : « Commencer toute planification par identifier les conceptions erronées. », « Ajouter des manipulations à mon enseignement. » « Concevoir des analogies. »

« Ajouter des séances de laboratoires. » « Rendre les concepts abstraits plus concrets. » « Mieux cibler les idées que les élèves trouveront difficiles. » Etc.

L'analyse qualitative du verbatim, à l'aide du logiciel *QDA Miner*, a fait émerger les catégories et les sous-catégories consignées dans le tableau suivant (tableau 11).

Catégories	Sous-catégories
Évolution des connaissances disciplinaires.	L'épistémologie du concept
	Les erreurs sémantiques
Évolution des connaissances didactiques.	Identification des conceptions alternatives des élèves
	Méthode d'enseignement – Enseignement avec l'analogie
	Méthode d'enseignement – Intervention par défi
Démarche réflexive sur son enseignement.	Changements dans les pratiques professionnelles
	Travail d'équipe
	Gestion du temps
	Gestion de classe
Efficacité de l'apprentissage.	Développement pertinent du concept scientifique
	Développement des habiletés
	Développement des attitudes
	Difficultés persistantes
Formation continue.	DBR
Contexte.	Milieu des élèves
	Niveau des élèves

Tableau 10 : Les résultats de l'analyse du verbatim du groupe de discussion final.

La particularité de cette formation était que, durant les mésocycles de construction et d'amélioration du matériel didactique, les enseignantes s'intéressaient surtout aux apprentissages des élèves et voyaient dans les améliorations à apporter une possibilité d'amélioration des apprentissages. Durant le mésocycle 5, les enseignantes se sont surtout intéressées à l'évolution de leur pratique enseignante : les connaissances disciplinaires et les connaissances didactiques. Elles ont longtemps parlé de leur engouement à connaître l'évolution socio-historique du concept et à s'approprier un langage correct en chimie. Elles ont aussi parlé des nouveautés apprises sur le plan didactique : l'utilisation des analogies et de l'intervention par défi. Les enseignantes ont fait le bilan de leur enseignement durant le DBR en explicitant les changements vécus, la gestion de classe mais surtout le travail d'équipe réalisé. Elles ont

repris brièvement certaines idées sur l'efficacité des apprentissages en retenant des événements marquants vécus durant l'expérimentation de la séquence. Le DBR réalisé semble avoir motivé les enseignantes à s'engager dans une formation continue collaborative.

Durant les rencontres planifiées au début de chaque mésocycle, les enseignantes faisaient des retours surtout centrés sur l'apprentissage des élèves. Durant ce groupe de discussion, leurs retours étaient plutôt centrés sur leur enseignement. Cette démarche réflexive a été très utile pour identifier l'impact de la formation sur le développement professionnel des enseignantes.

L'histogramme 10 présente la répartition des sous-catégories. La fréquence de la sous-catégorie « Changements dans les pratiques professionnelles » est la plus élevée. (« J'ai changé mon approche d'enseignement » ; « Je peux mieux cibler les idées que les élèves vont trouver difficiles, les idées pour lesquelles les élèves ont besoin de plus de temps » ; « La formation m'a aidé à construire des analogies, à faire des liens entre les notions et aussi à ajouter des séances de laboratoire. Les élèves sont très intéressés par les activités avec du matériel et aiment bien les manipulations » ; « Je peux mieux gérer le temps dans ma classe. » « Je vois mieux où sont les lacunes des élèves et je constate une amélioration dans les apprentissages. »). Durant le groupe de discussion, les enseignantes ont décrit encore une fois leur crainte de la première séance. Une crainte qui s'est estompée quand les élèves se sont engagés dans la tâche. Les enseignantes ont confirmé qu'elles sont devenues convaincues du bien-fondé de la nouvelle séquence quand elles ont observé son efficacité sur l'apprentissage (« Pour la première fois, mes élèves se sont rappelés de la première séance; on ne m'a pas demandé de répéter. »). Les enseignantes ont expliqué les effets positifs de la formation sur leur façon de concevoir, de critiquer et d'utiliser une analogie et ont apprécié l'approche qui leur permet de proposer des défis aux élèves. Elles ont répété les événements marquants relatés durant les rencontres, tels que les élèves qui pèsent un seul grain puis demandent eux-mêmes la masse d'un groupement ou la dévolution maintenue grâce à la manipulation (« Ils étaient bien animés et voulaient travailler » ; « Les élèves ont su comment gérer leur temps, même quand ils travaillaient en équipe. Ils ont respecté les consignes et il n'y a pas eu de problème. »).

Les participantes se sont dites motivées à rechercher des défis efficaces pour enseigner les concepts les plus abstraits (« La séquence m'a encouragée à rendre les concepts plus

concrets. »). Les enseignantes ont trouvé l'approche pertinente, même pour leurs élèves plus faibles (« Même mes élèves faibles en chimie ont pu faire les calcul correctement. » ; « Ils se sont intéressés au travail, surtout aux activités avec des manipulations. »). Elles ont même mentionné qu'elles aimeraient participer à un autre DBR. Elles ont dit avoir apprécié la répartition des rôles et la mise à profit de l'expertise de chacun (enseignantes et étudiante-chercheure). Elles ont trouvé que le travail avait été fructueux puisque toutes les participantes, enseignantes comme étudiante-chercheure, ont pu apporter une expertise particulière (« Je trouve que vos informations sont importantes mais que notre expérimentation avec les élèves est aussi importante. ». « Ce qui est bien est que notre groupe n'est pas homogène. Il y a des personnes plus expérimentées, d'autres dont la formation universitaire est plus récente, alors le partage entre nous est très utile et nous nous complétons bien. »). Elles seraient intéressées par un DBR portant sur la chimie organique, comme premier choix, et l'électrochimie comme deuxième choix, surtout parce que ces domaines de la chimie comportent eux aussi des concepts abstraits qu'elles ont parfois de la difficulté à enseigner.

D'après l'histogramme 10, les sous-catégories « Gestion de classe » ; « Gestion de temps » ; « Travail d'équipe » et « Intervention par défi » ont presque la même fréquence. Elles sont classées au deuxième rang après la sous-catégorie « Changements dans les pratiques professionnelles ». La fréquence des autres sous-catégorie, soit « Développement des attitudes », « Développement des habiletés » et « Développement pertinent du concept scientifique » n'est pas très grande puisque les enseignantes avaient déjà fait part de l'efficacité des apprentissages durant les rencontres. Reste la sous-catégorie relative à la catégorie « Évolution des connaissances disciplinaires » dont il n'a pas été tellement question durant le groupe de discussion, mais qui a été abordé durant les entretiens d'explicitation.

Dans le groupe de discussion, les enseignantes ont mentionné leur appréciation du développement de l'épistémologie et de l'évolution socio-historique du concept de mole (« Pour moi, tout le concept de mole a changé de sens. » « J'ai mieux acquis la mole. » « Avant je me servais tout de suite la formule sans trop réfléchir mais, maintenant, je ne sers d'un tableau et je présente la proportionnalité. » « Je reconnais l'importance du choix d'une définition » ; « Je suis contente d'avoir appris comment tenir compte des différentes parties de la définition de mole pour construire la séance »). Elles se sont dites convaincues que la conception d'une séquence d'enseignement devrait commencer par une appropriation personnelle des concepts enseignés

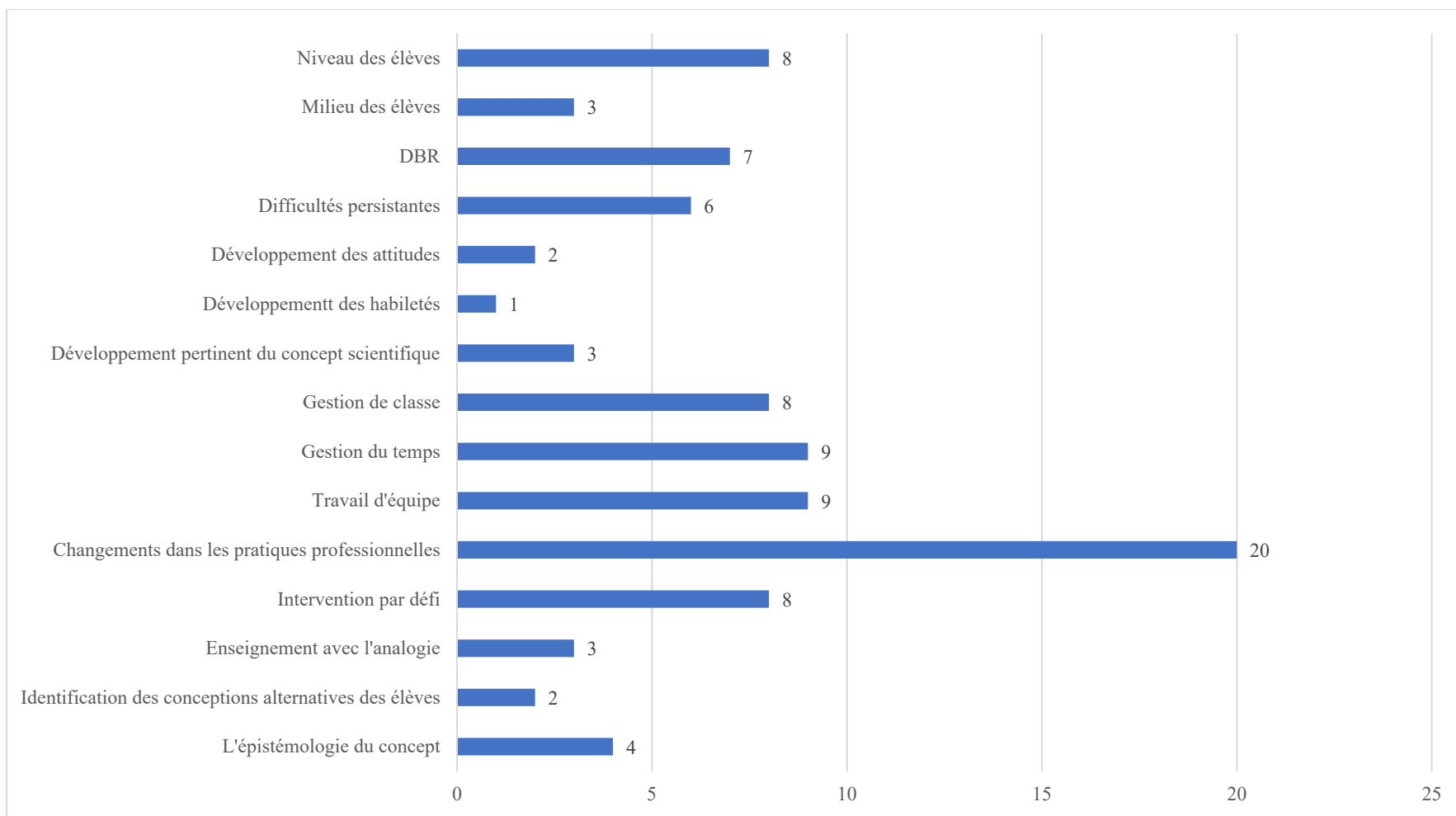
et une connaissance des éventuelles conceptions alternatives et difficultés d'apprentissage des élèves.

Les enseignantes ont signalé la motivation des élèves à manipuler. Cette motivation a été particulièrement évidente dans le groupe d'élèves qui a participé au cycle 1 du DBR. Ce groupe, qui s'engageait peu dans les tâches d'apprentissage classiques, s'est investi et s'est approprié le concept malgré son abstraction. Par contre, les enseignantes ont mentionné être relativement découragées par des difficultés persistantes chez ces élèves, comme celles liées à la lecture et à la compréhension des consignes.

Un évènement remarquable dans ce *Focus Group*, est que les enseignantes ont mentionné qu'elles ont réalisé les avantages de placer l'élève au centre de ses apprentissages et qu'elles ont repensé leur pratique enseignante en conséquence. Elles placent maintenant les besoins des élèves au centre de la planification et du pilotage de l'enseignement. Voici un exemple de propos des enseignantes :

J'arrive à mieux gérer le temps dans ma classe et à mieux prévoir les notions que les élèves vont trouver difficiles et qui vont leur demander plus de temps. En circulant entre les groupes, je me sens aussi plus habile pour poser des questions et faire des remarques qui vont aider les élèves à progresser et à réussir les activités proposées.

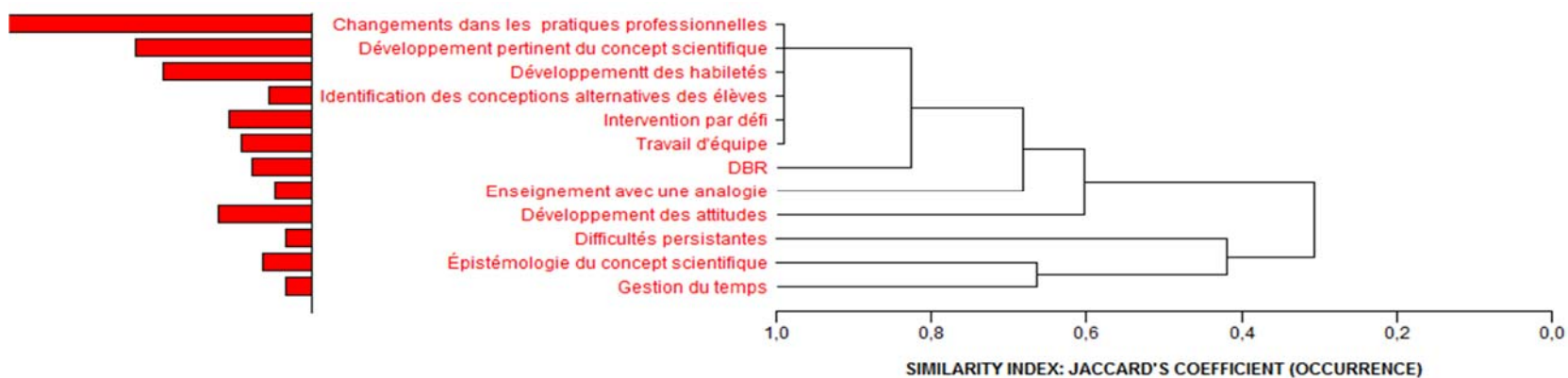
Aucun verbe décrivant une simple mémorisation ou une application automatique d'algorithmes n'a été repéré dans ce groupe de discussion. Les enseignantes ont plutôt mentionné l'effet de leur enseignement sur l'apprentissage et ont employé des verbes tels que travailler (13 fois), assimiler (5 fois) et acquérir (2 fois) pour décrire les processus d'apprentissage des élèves.



Histogramme 10 : Histogramme représentant la répartition des sous-catégories dans l'analyse du groupe de discussion (phase de l'analyse et de l'évaluation).

Catégorie	Code	Nombre de sections codées	% de cas
Évolution des connaissances disciplinaires	Épistémologie du concept scientifique	9	50,00%
	Erreurs sémantiques		
Évolution des connaissances didactiques	Identification des conceptions alternatives des élèves	8	100,00%
	Méthode d'enseignement – Enseignement avec une analogie	7	66,70%
	Méthode d'enseignement – Intervention par défi	15	100,00%
Démarche réflexive sur son enseignement	Changements dans les pratiques professionnelles	55	100,00%
	Travail d'équipe	13	100,00%
	Gestion du temps	5	33,30%
Efficacité de l'apprentissage	Développement pertinent du concept scientifique	32	100,00%
	Développement des habiletés	27	100,00%
	Développement des attitudes	17	66,70%
	Difficultés persistantes	5	16,70%
DBR	Communauté de praticiens	11	83,30%

Tableau 11 : Les résultats de l'analyse qualitative du groupe de discussion final



Dendrogramme 2 : Co-occurrence des sous-catégories de l'analyse qualitative des verbatim des entretiens d'explicitations.

4.5.2 Les entretiens individuelles

L'étudiante-chercheuse a mené une entrevue individuelle semi-dirigée, avec chacune des participantes. L'analyse qualitative des verbatim a fait émerger les catégories : évolution des connaissances disciplinaires ; évolution des connaissances didactiques ; démarche réflexive sur son enseignement ; efficacité de l'apprentissage ; DBR ; ainsi que plusieurs sous-catégories. Les catégories et les sous-catégories consignées dans le tableau 12 sont identiques à celles du groupe de discussion. En effet, durant l'entrevue, chacune des participantes a pu explorer ses points de vue d'une façon individuelle et personnelle sur les changements vécus durant la formation. Les résultats de l'entrevue individuelle ont consolidé certains des propos retenus dans le groupe de discussion mais les ont mieux distingués de ceux des autres enseignantes. Par exemple, durant le groupe de discussion, toutes les enseignantes participantes ont manifesté leur satisfaction au sujet du développement de leurs connaissances disciplinaires. Mais durant l'entretien, certaines ont verbalisé les difficultés qu'elles ont vécu en apprenant ce concept durant leur parcours scolaire et durant leur pratique enseignante.

En examinant la fréquence des sous-catégories, 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. La sous-catégorie « développement des habiletés », associée à 27 segments de texte, se retrouve au troisième rang et la sous-catégorie « intervention par défi », associée à 17 segments de textes, au quatrième rang. Il est intéressant de constater que toutes ces sous-catégories se retrouvent dans les six entretiens d'explicitation.

Le dendrogramme 2 montre une co-occurrence entre ces quatre sous-catégories et les sous-catégories « identification des conceptions alternatives des élèves » et « travail d'équipe ». Ces sous-catégories montrent une bonne co-occurrence avec la catégorie « DBR ».

Durant les entretiens individuelles, chaque enseignante a témoigné, d'une façon isolée, de son expérience dans cette recherche de type DBR. Leurs témoignages devaient permettre : d'identifier le changement de leurs représentations au sujet du concept de mole et de son enseignement ; d'identifier l'effet de la formation sur les pratiques professionnelles ; d'identifier l'évolution de leur pratique.

Les enseignantes confirment que leur savoir disciplinaire au sujet du concept de mole a évolué (« Je maîtrise mieux le concept de mole et je comprends mieux comment l'appliquer dans l'étude quantitative d'une réaction chimique. » « 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. » « Je comprends mieux, maintenant, d'où provient chaque formule. » « Cette formation a enrichi mes savoirs disciplinaires. Je me suis documentée sur le concept de mole et j'ai pu échanger avec mes collègues au sujet des difficultés qu'on peut rencontrer lorsqu'on enseigne un concept abstrait. »).

Les enseignantes ont réalisé qu'elles avaient l'habitude de trop placer l'accent sur l'aspect quantitatif du concept de mole, en enseignant surtout des algorithmes de calcul aux élèves. Au cours de la formation, elles ont reconnu l'importance d'expliquer l'aspect qualitatif et de créer des liens entre l'échelle sous-microscopique et l'échelle macroscopique (« 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, alors qu'elle est maintenant plutôt expérimentale. Les élèves comprennent avec quoi ils travaillent, ils comprennent que tout est formé d'atomes et de molécules. Même s'ils ne peuvent pas voir les atomes et les molécules à l'œil nu, ce n'est plus aussi abstrait pour eux. »).

Durant l'entrevue individuelle, les enseignantes 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. Les enseignantes ont expliqué que la formation sur l'évolution socio-historique du concept leur permet d'éviter des erreurs sémantiques. Elles comprennent que les domaines macroscopique et sous-microscopique ne peuvent être abordés avec le même langage et que mieux préciser les concepts en jeu dans chacun des domaines peut éviter de créer des obstacles didactiques chez les élèves (« 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. » « J'ai appris à faire attention au vocabulaire utilisé lors de mes explications. » « Il peut être intéressant d'inciter les élèves à faire des recherches sur les repères culturels en lien avec le concept de mole. »).

Durant l'entrevue individuelle, les enseignantes ont manifesté leur enthousiasme d'avoir réussi à planifier un défi qui permettait à l'élève de manipuler concrètement avant de transférer ses connaissances du domaine de référence au domaine cible. Elles ont répété leur étonnement à pouvoir expliquer un concept aussi abstrait en planifiant des activités de manipulation. Avant la formation, elles n'avaient jamais pensé que c'était possible. (« Avoir recours à du matériel dans des activités facilite l'acquisition de la mole par les élèves. » « On peut concrétiser un concept purement théorique en ayant recours à du matériel simple de la vie de tous les jours et à une animation qu'on peut facilement trouver sur internet. »). Les enseignantes ont critiqué les analogies qu'elles utilisaient et se réjouissent d'être mieux outillées pour construire ou critiquer des analogies. Elles sont convaincues que le choix de la douzaine ou de la dizaine n'est pas une bonne analogie pour représenter le monde sous-microscopique où les particules ne sont pas dénombrables.

Durant les entretiens d'explicitations, les propos des enseignantes ont témoigné d'une démarche réflexive de leur part. Les enseignantes ont considéré que la séance qu'elles ont planifiée et réalisée a été une réussite qui a dépassé leurs attentes (« Le fait d'aborder la mole d'une façon pratique a été un grand progrès pour moi. » « Je ne pensais pas travailler une partie expérimentale pour un concept comme celui de mole. ») Elles en ont tiré des leçons pour l'enseignement d'autres concepts (« Maintenant, j'essaierai de faire plus souvent le lien entre les deux échelles. »). Elles ont jugé plutôt sévèrement leurs anciennes préparations et ont trouvé de nombreuses lacunes dans les analogies qu'elles utilisaient (« L'analogie de la douzaine était incorrecte. » « Avec des grains qu'on ne peut pas dénombrer, c'était plus facile pour les élèves d'imaginer des atomes ou des molécules. »).

Les enseignantes ont aussi signalé que leur perception des aptitudes de leurs élèves s'est modifiée (« On peut trouver des moyens pour aider les élèves, pour leur faire comprendre des concepts difficiles. »). Elles ont remarqué le développement d'habiletés et d'attitudes, chez les élèves, ainsi que de leur savoir disciplinaire (« Les élèves semblent avoir compris ce qu'on a travaillé. » « Ils sont capables de modéliser le concept de mole. »). Par contre, les enseignantes ont soulevé la difficulté éprouvée par certains élèves à compléter une tâche complexe.

Elles ont signalé des difficultés persistantes chez certains élèves, mais s'abstenaient de les « juger ». Elles ont constaté qu'il serait important de mieux leur faire comprendre le rôle des symboles dans leurs opérations mathématiques. Elles ont hésité entre supprimer ou

conserver certaines redondances dans les exercices. Le changement des pratiques des enseignantes se manifestait par des craintes à la première période d'enseignement du concept. Les enseignantes avaient avoué, lors des rencontres, la peur vécue durant la première période. Elles en ont parlé à nouveau durant l'entrevue individuelle (« Tout d'abord j'étais hésitante, c'était nouveau pour nous. ») Une enseignante a qualifié son enseignement de « compréhensible » ; une autre de « constructif ». Une enseignante s'est réjouie du fait qu'elle n'a pas été obligée, comme par les années passées, de répéter l'explication à plusieurs reprises durant la séquence. Cette fois, a-t-elle dit, les élèves se rappelaient de tous les détails vus durant la première séance. Toutefois, une des enseignantes était déçue que les élèves n'aient pas retenu la valeur du nombre d'Avogadro, bien qu'ils en avaient compris la définition.

Le plus remarquable est que, durant l'entrevue individuelle, les enseignantes ont répété qu'au début de l'expérimentation, elles avaient de grandes craintes au sujet de la gestion de temps et des échéances fixées par l'examen officiel, mais qu'elles ont affirmé avoir noté que la longue durée de la séquence était compensée par un apprentissage efficace des élèves et de bons résultats dans les évaluations, ce qui leur a donné une motivation intrinsèque pour poursuivre.

Les enseignantes ont reconnu l'efficacité du travail en équipe. La mise en commun des différentes expertises a été mise de l'avant pour expliquer la réussite de la conception de la séance. Les enseignantes ont surtout apprécié les observations de classe mutuelles et les échanges informels à la fin de chaque séance. Elles ont trouvé que le partage des expertises avait été fructueux et les avait aidé à réussir leur enseignement.

Elles ont signalé l'importance des conceptions alternatives des élèves. Elles n'avaient pas l'habitude d'en tenir compte, sauf de façon très occasionnelle, mais elles ont réalisé qu'il est utile de le faire. À l'avenir, elles prévoient mieux s'informer au sujet des conceptions fréquentes des élèves avant de planifier des séances d'apprentissage.

L'engagement des élèves (« Tous les élèves, sans exception, participaient aux activités. ») et l'« interaction plus dynamique » entre les élèves et les enseignantes ont encouragé les enseignantes à adopter des approches actives (« L'enseignement de ce concept, d'une façon pratique et à l'aide de manipulations, a rendu le concept de mole plus concret et facilité son acquisition. J'essaierai aussi de rendre d'autres concepts plus concrets. »). Aussi, les enseignantes ont apprécié la variété de supports et de matériel didactique prévue pour la séance,

qui semble avoir contribué à l'appropriation des concepts abstraits (« L'importance de ce qui est visuel et tactile. »).

En bref, les résultats présentés dans ce chapitre ont montré l'état des lieux avant le début du cycle de DBR, l'évolution survenue au cours de la phase de conception et les faits saillants d'une démarche réflexive collective et individuelle. L'interprétation et la discussion des résultats présentée dans le prochain chapitre permettent de vérifier l'atteinte des objectifs de la recherche.

5 Interprétation et discussion des résultats

Ce chapitre propose l'interprétation et la discussion des résultats présentés au chapitre précédent. Cette interprétation et cette discussion sont exposées dans l'ordre du déroulement de cette recherche de type DBR. Le chapitre se termine par un retour sur les objectifs de la recherche.

5.1 Le mésocycle (1) : Analyse et exploration

Le cycle de DBR a commencé par une phase d'analyse et d'exploration. Les données recueillies durant cette phase devaient permettre de dresser un état des lieux pour confirmer la problématique de l'enseignement et de l'apprentissage du concept de mole décrite au premier chapitre de la présente recherche.

L'analyse du groupe de discussion et des fiches de préparation a montré que les enseignantes connaissaient les principes et les avantages des méthodes actives (Hattie, 2009), mais craignaient de les appliquer dans le contexte de l'enseignement de la mole. Elles essayaient de faire une transposition didactique interne des manuels scolaires pour concevoir le texte de savoir à transposer aux élèves. Selon les représentations des enseignantes, l'élève était responsable de ses erreurs puisque, d'une part, il ne maîtrisait pas les connaissances et que, d'autre part, il manquait de capacités logiques et d'aptitudes au raisonnement. Ces représentations expliquaient que l'enseignement se moulait à des perspectives traditionnelles (Charnay et Mante, 1991 ; Institut de recherche sur l'enseignement des mathématiques, [IREM], 2013). En se référant au tableau 3, qui présente les trajets de la formation (Astolfi et al., 2008), le modèle pédagogique des enseignantes pouvait donc être considéré comme étant principalement transmissif.

Les enseignantes n'ont parlé que de l'aspect quantitatif du concept de mole et expliquaient surtout les moyens d'aider les élèves à remédier à leurs difficultés en lien avec cet aspect. L'importance que les enseignantes accordaient aux algorithmes mathématiques n'est pas surprenante : Moss et Pabari (2010) ont montré que lorsqu'on demande à des enseignants d'écrire en 5 minutes ce qu'ils savent du concept de mole, les textes produits comportent surtout

des nombres (exemple : nombre d'Avogadro) et des formules. Ces algorithmes permettent aux élèves de répondre correctement à la plupart des questions habituelles sur le concept, mais ne garantissent en rien une compréhension réelle (Fang et al., 2016 ; Moss et Pabari, 2010). De leur côté, les élèves risquent de relier la mole à l'un des trois volets quantitatifs présents dans la définition : soit le nombre d'Avogadro, soit la masse, soit la masse molaire (Kolb, 1978).

Les enseignantes ont parlé de l'aspect abstrait du concept, mais n'ont pas tellement insisté sur leur façon d'en présenter les aspects qualitatifs aux élèves. Leurs propos ont toutefois permis de comprendre qu'elles avaient recours aux analogies qu'on trouve dans plusieurs manuels scolaires, telles que les dizaines ou les douzaines, mais qu'elles n'en étaient pas très satisfaites parce que ces analogies appartiennent au domaine macroscopique. En effet, Gorin (1994), Kolb (1978) et Vogel (1992) dénoncent ces analogies dans lesquelles les entités ne sont pas dénombrables et le domaine de référence présente peu de similarité avec le domaine cible. Ces auteurs expliquent d'ailleurs que ces analogies risquent de créer des obstacles didactiques chez les élèves.

Les enseignantes ne réalisaient pas l'importance du concept de mole dans la progression des apprentissages en chimie et plus particulièrement au niveau scolaire EB-9. Surchargées par le nombre de concepts à enseigner en peu de temps, elles préféreraient passer très rapidement sur ce concept, et parfois même l'ignorer, d'autant plus qu'il leur semblait peu utile pour l'examen officiel. Comme l'ont montré Boilevin (2013) et Potvin (2019) et, ce genre d'attitude, qui est fonction des épreuves officielles, est assez fréquent en enseignement des sciences. De plus, comme plusieurs des enseignantes qui ont participé à notre recherche n'étaient pas des spécialistes de la chimie, il n'était pas surprenant qu'elles aient tendance à enseigner la mole de la même façon qu'elles l'avaient elles-mêmes apprise au secondaire (Kind et Kind, 2011). Enfin, même celles qui étaient des spécialistes de la chimie ont mentionné que, durant leur formation universitaire, le concept de mole leur avait été présenté rapidement, avec un accent très net placé sur les formules et les algorithmes de calcul, ce qui corrobore les résultats de Furió et al. (2000).

Les difficultés d'apprentissage du concept de mole décrites par les enseignantes corroboraient celles qui sont recensées dans la problématique et le cadre théorique de la présente recherche. Les élèves confondaient les symboles, présentaient des lacunes en mathématiques (notamment la notation scientifique des nombres) et ne comprenaient pas toujours les consignes.

Ces difficultés ont émergé dans les réponses à une épreuve diagnostique administrée à des élèves ayant reçu un enseignement portant sur la mole. Les réponses des élèves indiquaient une assez bonne appropriation des aspects quantitatifs du concept, surtout en ce qui concerne l'application de formules, mais la compréhension réelle des aspects qualitatifs du concept restait toujours problématique, un problème bien documenté par Pekdag et Azizoglu (2013).

Les résultats de cette évaluation diagnostique ont aussi confirmé les confusions linguistiques chez les élèves. D'une part, tel que montré par Dierks (1981), les mots ou les symboles « molécule », « mole », « mol » et « mL » causaient des confusions phonétiques. D'autre part, l'expression « quantité de matière » entraînait diverses confusions, surtout la confusion entre une masse et un nombre d'entités, ce qui confirmait les travaux de Dierks (1981), ainsi que ceux de Rocha-Filho, (1990/2011). Ces résultats expliquent en partie que les enseignantes préféraient utiliser l'expression « nombre de moles », souvent rencontrée dans les exercices des manuels scolaires (De Bièvre, 2014 et Guinta, 2015), sans trop s'attarder à la définition de la mole.

En conclusion, les résultats du groupe de discussion et de l'analyse des fiches de préparation des enseignantes ainsi que l'analyse des résultats des élèves à une évaluation diagnostique confirmaient que 1) le modèle pédagogique des enseignantes était surtout transmissif, 2) les enseignantes éprouvaient des difficultés dans la transposition didactique des aspects qualitatif et quantitatif du concept de mole, et que 3) les élèves éprouvaient des difficultés d'apprentissage découlant de plusieurs obstacles didactiques.

5.2 Les mésocycles (2), (3) et (4) : Conception et amélioration du matériel didactique

Durant la phase de conception, les commentaires des enseignantes étaient surtout centrés sur la catégorie « efficacité des apprentissages » des élèves. Cette catégorie regroupait les sous-catégories suivantes : « développement pertinent du concept », « développement des habiletés », « développement des attitudes » et « difficultés persistantes ». Les enseignantes ont relié ces développements à l'« intervention par défi » une sous-catégorie qui, avec les sous-

catégories « gestion du temps » et « gestion de la classe », formait la catégorie « retour sur les pratiques en classe ».

Les propos des enseignantes ont confirmé que leur modèle pédagogique a évolué. D'une part, les enseignantes ne percevaient plus les erreurs des élèves comme la conséquence d'un manque d'attention ou d'une mauvaise attitude de leur part ; elles analysaient les résultats des élèves pour mieux en comprendre leurs processus cognitifs, pour identifier les lacunes dans leurs apprentissages et pour améliorer la façon dont elles enseignent le concept de mole. D'autre part, elles reconnaissaient l'efficacité de proposer aux élèves un défi qui exige des manipulations. Le dynamisme et la motivation des élèves ont remis en question leurs anciennes pratiques qui demandaient peu d'implication de la part des élèves.

Les résultats des élèves semblent indiquer une bonne appropriation du concept. La grande majorité des élèves a été capable de répondre correctement aux questions relatives au concept de mole. La plupart des élèves ont expliqué leur raisonnement, n'ont plus appliqué aveuglément des formules et ont été capables de résoudre une tâche relativement complexe. Ces résultats découlent de la résolution de problèmes conçus pour que les élèves soient amenés à appliquer, de façon concrète, leur compréhension d'un concept (Potvin, 2019). Les défis proposés par les enseignantes ont respecté la zone proximale de développement des élèves (Vygotski, 1997) et ont mis les élèves en activité pour développer le concept, créant ainsi une dévolution (Brousseau, 1997). Les enseignantes ont réussi cette dévolution car elles ont construit une activité de manipulation où l'élève s'engage dans une tâche ouverte. L'élève doit comprendre le problème par lui-même ; élaborer une hypothèse qu'il va éprouver (Carbonneau et Marley, 2015 ; Carbonneau, Marley et Selig, 2013 ; Williams, 1991) ; manipuler des objets concrets et trouver la solution. Le choix des objets de sa vie quotidienne (sucre, poivre, etc.) facilite l'acquisition de concepts abstraits (Carbonneau et Marley, 2015) et augmente la motivation de l'élève (Williams, 1991). Cela dit, la réussite de la manipulation dépend aussi de l'attention de l'enseignant aux actions de l'élève et à ses questions.

et ont permis aux élèves d'atteindre le domaine de référence en se basant sur une analogie qui semble réussie (Heywood et Parker, 2010). Dans ce domaine de référence, les enseignantes ont invité les élèves à trouver, pour leur regroupement de grains, un nombre qu'ils devaient nommer à la façon du « nombre d'Avogadro ». Tel que montré par Gabel, Sherwood et Enochs (1984), cet emploi d'un nom familier pour le nombre de grains s'est avéré efficace

pour créer un pont avec le domaine cible, appréhender les termes scientifiques et réduire les difficultés d'apprentissage des élèves.

L'enseignement de l'aspect qualitatif du concept peut être considéré comme réussi puisque les élèves semblaient mieux en comprendre la nature réelle ainsi que mieux distinguer et relier le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique. La conception d'une structure continue de la matière, présente au départ chez de nombreux élèves, semble avoir évolué vers une structure discontinue, quand les élèves ont commencé à distinguer le grain de sable observable à l'œil nu de celui qu'ils pourraient voir à l'échelle sous-microscopique. La construction de liens entre le domaine macroscopique et le domaine sous-microscopique a aussi été constatée dans les exercices que les élèves ont conçus. De plus, les élèves ont été en mesure de proposer des situations intéressantes intégrant le concept, tout en évitant la plupart des erreurs sémantiques qu'ils avaient l'habitude de faire, ce qui confirme le travaux de Dierks (1981) qui a montré l'avantage de proposer aux élèves une introduction précoce, mais relativement simple, du concept de mole.

Il importe toutefois de signaler que la séquence d'enseignement et d'apprentissage se limitait à l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif du concept au moyen d'un défi comportant une analogie ancrée dans la vie quotidienne de l'élève. Certaines notions importantes, telles que le calcul de la masse molaire ou l'unité de masse atomique, n'ont pas été abordées. De plus, le niveau des énoncés et des exercices se situait presque toujours au niveau de l'application, et rarement à celui de l'analyse. Enfin, il faut constater que l'expression « quantité de matière » est restée problématique et causait plusieurs confusions relatives à des grandeurs physiques comme le volume, la masse et le poids. Le problème de ces confusions n'a pas été résolu de façon satisfaisante.

En conclusion, les commentaires des enseignantes et les résultats des élèves aux évaluations semblent confirmer une évolution dans l'efficacité de l'apprentissage des élèves et l'évitement des principaux obstacles didactiques habituellement causés par l'enseignement du concept de mole.

5.3 Le mésocycle (5) : Impact de la formation

Durant les rencontres du groupe de discussion final et les entretiens d'explicitation, les enseignantes ont décrit le développement professionnel vécu durant le cycle du DBR. Les propos des enseignantes, qui ont analysé leurs pratiques pour en conserver les réussites et en corriger les lacunes, témoignaient du développement d'une pensée réflexive. Entre la première et la dernière rencontre du groupe de discussion, on constate une évolution 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). Tel que Altet (2013) et Perrenoud (2008) l'ont montré, ce développement de la pensée réflexive est souvent l'indice d'une plus grande compétence et d'une plus grande autonomie, c'est-à-dire d'une « professionnalisation » accrue.

L'analyse des rencontres du groupe de discussion et des entretiens d'explicitation a confirmé que les enseignantes ont développé des savoirs disciplinaires ainsi que des compétences de travail d'équipe, de construction et de pilotage de séances d'enseignement. Autrement dit, les enseignantes ont développé « l'agir professionnel [et] l'agir éducationnel » (Vial et Caparros-Mencacci, 2007, p. 102).

En fait, tel que précisé dans le cadre théorique, cette recherche visait la reconstruction de l'enseignement en travaillant trois dimensions : pratique, technique et scientifique (Duit, 2007).

Sur le plan pratique, les enseignantes ont eu l'impression qu'elles géraient mieux leur classe et leur temps, notamment parce que l'engagement des élèves dans la tâche a augmenté leur confiance dans la pertinence des activités proposées. Toutefois, certaines enseignantes ont trouvé que le nombre élevé d'élèves par classe demeurait une contrainte très importante.

Sur le plan technique, les enseignantes ont planifié, sous la direction de l'étudiante-chercheuse, une situation didactique dans le cadre de laquelle les conditions de fonctionnement ont été précisées et les caractéristiques des activités ont été déterminées. De plus, tel que prévu par Brousseau (2013), la réalisation de cette situation a favorisé des interactions en classe.

Sur le plan scientifique, les enseignantes ont acquis le savoir et développé les compétences langagières leur permettant d'adopter un langage scientifique qui distinguait les domaines du savoir, en chimie, et créait des liens entre ces domaines. Les enseignantes ont

clairement affirmé qu'elles se sont mieux approprié le concept de mole, durant la formation, alors qu'auparavant, elles éprouvaient elles-mêmes certaines difficultés avec ce concept. Tel que montré par 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 de ce concept, l'a rendu plus facilement « enseignable ».

En conclusion, l'analyse des rencontres du groupe de discussion et des entretiens d'explicitation semble indiquer que l'« épistémologie pratique » (Marlotet et Toullec-Therry, 2014, p. 8) travaillée durant cette formation a favorisé une évolution des connaissances professionnelles des enseignantes.

5.4 Retour sur les objectifs de la recherche

L'environnement créé dans un DBR est celui d'un accompagnement professionnel où, dans un climat de confiance, chacun formule des hypothèses, les présente aux autres participants et les met en pratique en incitant tout le groupe à s'engager dans leur vérification. Il faut qu'une « intelligence des situations » (Vial et Capparos-Mencacci, 2007, p. 147) soit créée et favorise des relations humaines harmonieuses. Ce climat positif génère autonomie, créativité, responsabilité et pertinence du dispositif installé (Vial et Capparos-Mencacci, 2007). Cette « dynamique de la relation » (Perez-Roux, 2007) transforme le chercheur en accompagnateur légitime aux yeux du praticien qui désire s'engager dans un processus de développement professionnel.

Rappelons que l'objectif général de la présente recherche était d'étudier l'impact d'une formation, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur l'évolution de leurs connaissances et compétences professionnelles en enseignement de la chimie et, plus particulièrement, sur l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage du concept de mole.

Les objectifs spécifiques étaient :

- 1- Identifier les effets du dispositif de formation installé, basé sur le *Design Based Research* sur l'évolution des connaissances professionnelles des enseignants.

- 2- Déterminer les effets de la formation sur l'amélioration de l'enseignement du concept de mole.
- 3- Identifier les moyens mobilisés par la séquence construite qui favorisent l'évitement des obstacles didactiques.

L'analyse et l'interprétation des données recueillies indiquent un effet relativement positif de la formation sur l'évolution des connaissances et des compétences professionnelles des enseignantes participantes. En effet, les enseignantes ont expliqué avoir repensé leur méthode d'enseignement et comptent la modifier en intégrant ce qu'elles estiment être les deux principaux acquis de la formation : construire des analogies efficaces et enseigner en proposant des défis.

Par ailleurs, le langage adopté par les enseignantes à la fin de la formation a montré qu'elles analysent leur enseignement en considérant le triangle didactique : elles remettent en question leur façon habituelle d'effectuer la transposition didactique et comprennent, comme l'affirment Charnay et Mante (1991), que la dévolution est essentielle au maintien du contrat didactique.

De plus, les enseignantes ont reconnu l'efficacité du travail en équipe où l'expertise de chacun est mise en valeur. Les réalisations des enseignantes dans la conception de séances d'enseignement du concept de mole les a motivées à s'engager dans de nouveaux cycles de DBR qui leur permettraient d'enseigner d'autres concepts relativement abstraits de la chimie.

Si l'on considère que l'apprentissage est, du moins en partie, une projection de l'enseignement (Couture, Dionne, Savoie-Zajc et Aourousseau, 2015), les résultats très probants des évaluations des élèves semblent confirmer un enseignement efficace dans le cadre duquel les principaux obstacles didactiques ont été évités et une construction pertinente du concept scientifique a été réalisée.

Le DBR s'est avéré efficace pour améliorer l'apprentissage et éviter les obstacles didactiques mais aussi pour atteindre les objectifs de la formation et provoquer une évolution dans les pratiques professionnelles des enseignantes. En bref, il semble donc que la formation a eu un impact positif sur l'évolution des pratiques professionnelles des enseignantes.

Certaines limites de cette recherche et quelques recommandations sont présentées dans le prochain et dernier chapitre.

6 Conclusion

6.1 Résumé de la recherche

Plusieurs chercheurs en sciences de l'éducation, comme Kolb (1978), Azcona et al. (2002), Moss et Pabari (2010) ainsi que Fang et al. (2016), ont soulevé la problématique de l'enseignement du concept de mole. Ce concept nœud dans la progression des apprentissages en chimie est rarement enseigné de façon satisfaisante, et ceci quel que soit le programme ou le pays. Faute de formation disciplinaire universitaire portant précisément sur ce concept, de connaissances épistémologiques et socio-historiques, et d'une transposition didactique pertinente dans les manuels scolaires, les enseignants ne disposent pas des moyens nécessaires pour que leur enseignement de ce concept soit aussi efficace qu'ils le souhaiteraient.

Les recherches confirment que l'enseignement met habituellement l'accent sur l'aspect quantitatif de ce concept en insistant surtout sur les algorithmes qui permettent de compléter des exercices et de répondre à des questions d'examens. Toutefois, des réponses correctes obtenues à la suite d'un calcul ne signifient pas nécessairement que l'élève s'est approprié le concept. Fang et al. (2016) proposent une carte conceptuelle qui pourrait orienter l'enseignement de ce concept en distinguant clairement son aspect « nombre » et son aspect « masse ». Pekdag et Azizoglu (2013) insistent sur la nature à la fois conceptuelle et quantitative de la mole. L'enseignement de ce concept doit tenir compte des trois domaines du savoir en chimie : le sous-microscopique, le macroscopique et le symbolique et des liens qu'il crée entre eux. Il doit aussi prendre en considération que ce concept n'est pas mesurable, mais calculé à partir de propriétés physiques de la matière à l'échelle macroscopique.

L'évolution socio-historique de la mole est complexe. En 1900, Ostwald définit la mole comme étant une « masse normale ». En 1961, on reconnaît la mole comme étant un concept pour compter les entités sous-microscopiques. En 1971, la mole devient l'unité de la « quantité de matière », sans toutefois que cela soit clairement mentionné dans la définition. Les diverses définitions qui se sont succédées laissent donc l'enseignant perplexe devant le choix d'une définition adéquate. De plus, les confusions linguistiques liées à l'apprentissage de la mole sont nombreuses, telles que des confusions phonétiques (mol et molécule), et des confusions symboliques (n, m, M, N. etc.).

Un enseignement de la mole qui ne tient pas compte de ses deux aspects, qualitatif et quantitatif, de l'évolution socio-historique du concept et d'un évitement des erreurs sémantiques risque de provoquer des obstacles didactiques chez les élèves. Par conséquent, l'objectif général de cette recherche de développement était d'étudier l'impact d'une formation portant sur le concept de mole donnée à des enseignants du secondaire sur l'évolution de leur connaissances et compétences professionnelles et sur la réduction des obstacles didactiques chez les élèves.

La formation a été planifiée selon un cycle de DBR (*Design Based Research*) qui comportait de nombreuses interactions entre l'étudiante-chercheuse et les six enseignantes participantes d'une école du Liban. Ce cycle de DBR se subdivisait en cinq mésocycles dans chacun desquels l'étudiante-chercheuse animait des activités de perfectionnement imbriquées dans les autres activités.

Le premier mésocycle consistait essentiellement en un microcycle d'analyse et d'exploration ; les 2^e, 3^e et 4^e cycles comportaient des microcycles de conception du matériel didactique ainsi que des microcycles d'analyse et d'exploration, d'évaluation et de réflexion ; le dernier mésocycle consistait surtout en un microcycle d'évaluation et d'exploration.

Durant le premier mésocycle, l'analyse d'une collecte de données recueillies lors d'un groupe de discussion, une analyse de fiches de préparation et une évaluation diagnostique des apprentissages a confirmé la problématique décrite ci-dessus.

Durant les trois mésocycles suivants (2^e, 3^e et 4^e), un matériel didactique, qui consistait en une séquence d'enseignement du concept de mole, a été élaboré par les enseignantes, avec l'aide de l'étudiante-chercheuse, et mis à l'essai en classe. Chaque mésocycle commençait par un retour réflexif des enseignantes qui avaient expérimenté le matériel didactique en classe. Les enseignantes ont décrit leur mise à l'essai en soulignant certains événements marquants, en partageant des résultats du travail de leurs élèves et en proposant des améliorations à la séquence d'enseignement. Par la suite, une activité de perfectionnement de synthèse a été animée par l'étudiante-chercheuse, une amélioration du matériel d'équipe a été effectuée en équipe et une nouvelle mise à l'essai par les enseignantes a été réalisée en classe. Chaque mésocycle se terminait par une évaluation des résultats des élèves.

Durant le dernier mésocycle, l'étudiante-chercheuse a animé un groupe de discussion pendant lequel les enseignantes participantes ont partagé leurs impressions au sujet des effets de la formation sur leur enseignement du concept de mole et sur les apprentissages des élèves.

L'étudiante-chercheuse a terminé ce mésocycle par un entrevue individuelle permettant d'identifier les effets de la formation sur l'évolution des connaissances et des compétences professionnelles de chaque enseignante.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus semblent montrer des effets positifs sur l'évolution des connaissances et des connaissances professionnelles des enseignantes. L'interprétation des résultats des élèves aux évaluations semble montrer un effet positif sur les apprentissages du concept de mole et sur la réduction des obstacles didactiques chez les élèves. Cela dit, une analyse d'une collecte de données menée auprès d'élèves dans le cadre d'une recherche visant particulièrement l'efficacité des apprentissages du concept au cours de la séquence pourrait être intéressante pour confirmer les résultats ci-dessus.

L'impact global de la formation semble donc aller dans le sens souhaité au début du cycle du DBR.

Cette recherche présentait néanmoins d'assez nombreuses limites, qui sont présentées dans la prochaine section.

6.2 Les limites de cette recherche

Le petit nombre d'enseignantes participantes de cette recherche a facilité la collaboration entre l'étudiante-chercheuse et les enseignantes, de même que la création de ponts entre la théorie et la pratique. Toutefois, un plus grand nombre d'enseignants et de classes, dans plusieurs écoles, aurait formé un échantillon plus représentatif de la population des enseignants et des élèves du secondaire, au Liban, notamment parce qu'il aurait été plus hétérogène et aurait comporté des classes d'élèves de divers milieux socioéconomiques. De plus, l'ensemble des enseignantes aurait alors présenté une plus grande diversité d'âge, d'années d'expérience et de formation initiale, ce qui aurait permis d'analyser l'évolution des pratiques professionnelles en fonction de l'une ou l'autre de ces variables.

La langue dans laquelle s'est déroulée la recherche est également une limite relativement importante car, au Liban, le français est la langue seconde de plusieurs enseignants et élèves (la langue première étant l'arabe). Il est vrai que le Liban est un pays francophone et que les mathématiques et les sciences sont enseignées en français, mais certaines difficultés,

surtout chez les élèves, sont liées à une maîtrise insuffisante de cette langue, notamment pour la compréhension des consignes de problèmes et d'exercices.

Le certificat d'éthique de cette recherche permettait d'analyser les résultats des élèves à des évaluations que les enseignantes font habituellement dans leur classe (évaluation formative, évaluation diagnostique et évaluation sommative). Ces résultats étaient pertinents et relativement exhaustifs mais, avec le recul, il est probable que des enregistrements vidéo du travail des élèves auraient pu fournir des renseignements plus complets sur l'évolution des schèmes cognitifs des élèves. De plus, des entretiens d'explicitation menés avec chaque élève auraient permis de mieux évaluer l'efficacité de la séquence d'enseignement en identifiant son effet sur l'appropriation du concept de mole et des domaines du savoir en chimie.

De même, en ce qui concerne les enseignantes, ces enregistrements vidéo auraient peut-être aidé à mieux évaluer les interactions enseignante-élèves et le vocabulaire employé par les enseignantes. Ils auraient également été utiles pour comparer l'enseignement du concept de mole au début et à la fin de la recherche et pour mieux percevoir l'évolution des pratiques enseignantes.

Cette recherche de type DBR portait sur une formation relative à la définition du concept de mole, à la compréhension de ses aspects qualitatifs et quantitatifs et l'appréhension des liens entre les domaines sous-microscopique et macroscopique. Une poursuite du DBR pour compléter l'enseignement du concept de mole en abordant les concepts de masse molaire et d'unité de masse atomique, ou pour enseigner des concepts qui dépendent du concept de mole, comme la stœchiométrie ou l'analyse quantitative, aurait pu compléter l'analyse de l'évolution des connaissances et des compétences professionnelles des enseignants.

Les résultats de cette recherche remettent en question certains profils de la formation initiale des enseignants ainsi que le lexique de ce concept. Ces aspects sont abordés dans la section suivante.

6.3 Les recommandations

Les recommandations ci-dessous sont basées sur le triangle didactique, auquel est ajouté la transposition didactique externe (celle qui est faite par la noosphère, c'est-à-dire les

concepteurs des programmes d'études et les auteurs de manuels scolaires et autre matériel didactique).

Une des recommandations les plus évidentes qui découle de cette recherche concerne la relation enseignant-savoir du triangle, et plus précisément la formation initiale des enseignants de sciences du secondaire. Comme l'ont montré Furió et al. (2000), Azcona et al. (2002) ainsi que Rollnick, Bennett, Rhemtula, Dharsey et Ndlovu (2008), et comme l'a confirmé la présente recherche, un bagage relativement élevé de connaissances épistémologiques et socio-historiques au sujet du concept de mole est indispensable pour l'enseigner correctement. Malheureusement, l'absence de telles connaissances est une des grandes lacunes de la formation initiale des enseignants, même de ceux qui ont suivis un nombre relativement élevé de cours de chimie de niveau universitaire. Un enrichissement de la formation initiale en chimie et des aspects épistémologiques et socio-historiques qui sous-tendent cette discipline serait donc hautement souhaitable. Pour ce faire, les universités pourraient s'inspirer d'un cours tel que le *PHY 3012, Évolution des concepts en physique*, de l'Université de Montréal, qui aborde ces aspects pour la physique.

Toujours en ce qui concerne la relation enseignant-savoir, et plus précisément la transposition didactique interne du concept de mole, cette recherche a montré l'importance de cesser d'avoir recours à des analogies telles que la dizaine et la douzaine pour l'expliquer. Il est préférable de proposer des analogies qui impliquent des quantités beaucoup plus grandes d'entités.

Une autre recommandation concerne la relation élève-savoir. Cette recherche a fait clairement ressortir l'avantage de proposer des activités de résolution de problème comportant des manipulations où l'élève s'investit dans la résolution d'une tâche qui a du sens pour lui (avec des grains de sel, de sable ou de riz) pour favoriser une construction adéquate du concept de mole par les élèves.

Pour ce qui est de la relation enseignant-élève, cette recherche suggère que le contrat didactique habituel entre l'enseignant et ses élèves, qui comporte des attentes de l'enseignant au sujet de la réalisation d'exercices purement quantitatifs, devrait être modifié. Les attentes de l'enseignant envers ses élèves devraient concerner davantage une compréhension qualitative du concept de mole plutôt que la simple application d'algorithmes. De plus, lorsque des exercices

quantitatifs sont proposés, les enseignants auraient avantage à mieux préciser leurs attentes concernant la prise en compte, par les élèves, des unités de mesure impliquées dans leur calcul.

Les enseignantes ont mentionné à la fin de la recherche des concepts de chimie dont l'enseignement et l'apprentissage sont aussi problématiques que ceux de la mole. Elles ont manifesté leur désir de participer à d'autres recherches collaboratives comme le DBR. La formation, qui pourrait découler de la présente recherche et d'autres recherches semblables, d'une communauté de pratique au sein de la communauté des enseignants libanais serait un atout pour permettre une formation continue répondant à des besoins spécifiques et assurant un développement de leur pratique professionnelle (Couture et al., 2017).

En ce qui concerne la transposition didactique externe, plusieurs lacunes ont été signalées dans les programmes d'études et les manuels scolaires. De façon générale, on pourrait souhaiter une transposition beaucoup plus scientifique et rigoureuse de ce concept, qui fasse clairement ressortir qu'une mole est une quantité de matière (De Bièvre, 2014). Plus précisément, les manuels pourraient mieux préciser que le concept de mole désigne un regroupement d'entités à l'échelle sous-microscopique qui ne peut pas être mesuré de façon directe, avec des instruments, mais est calculé de façon indirecte à partir de variables physiques comme la masse ou le volume. Peut-être même pourraient-ils ajouter cette précision (en caractères gras ci-dessous) à la deuxième partie de la définition de la mole :

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 mol^{-1} .

*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 spécifiés de particules. (CGPM, 2018, p. 4). **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 et le volume.***

D'ailleurs, pour aller plus loin, et même si cette recommandation ne ferait certainement pas l'unanimité chez les chimistes et les didacticiens de la chimie, on pourrait peut-être même

songer à remplacer l'expression « quantité de matière », qui évoque trop l'unité « masse », par l'expression « nombre en mole ». En effet, en français, la préposition « en » est employée, dans le langage scientifique, pour introduire un complément du nom et désigner un moyen. 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 de la chimie ont encore beaucoup de travail à faire pour que le concept de mole, et sa transposition didactique, deviennent moins ambigus.

Les résultats de la présente recherche sont loin de régler tous les problèmes relatifs à l'enseignement du concept de mole. Des recherches supplémentaires pourraient contribuer à concevoir un répertoire d'outils didactiques permettant d'améliorer cet enseignement. Par exemple, ces recherches pourraient porter sur la construction de schèmes cognitifs efficaces par les élèves, sur leur compréhension des domaines sous-microscopique et macroscopique et des liens entre eux, notamment à l'aide d'analogies judicieusement choisies. Enfin, en psychopédagogie, certaines recherches pourraient s'intéresser aux facteurs favorisant une meilleure gestion de la classe, même avec de grands groupes d'élèves, lors de la résolution de problèmes complexes qui exigent un certain nombre de manipulations.

Bibliographie

- Akerson, V., et Hanuscin, D. (2007). Teaching nature of science through inquiry: Results of a 3-year professional development program. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(5), 653-680.
- Albe, V. (2007). *Des controverses scientifiques socialement vives en éducation aux sciences. État des recherches et perspectives*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, université Lyon 2, Lyon.
- Alexander, M. D., Ewing, G. J., et Abbott, F. T. (1984). Analogies that indicate the size of atoms and molecules and the magnitude of Avogadro's number. *Journal of Chemical Education*, 61(7), 591.
- 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.
- Altet, M. (2002). Une démarche de recherche sur la pratique enseignante : l'analyse plurielle. *Revue française de pédagogie*, 138, 85-93.
- Altet, M., Paquay, L., et Perrenoud, P. (2002). *Formateurs d'enseignants: quelle professionnalisation?* De Boeck Supérieur.
- Ameline, C., Bernard, L., Boggio, C., Chareyron, M., Coppens, N., Johann-Dieudonne, A., ... Simon, H. (2014). *Physique Chimie 2de*. Paris: Nathan.
- Anderson, T., et Shattuck, J. (2012). Design-Based Research: a decade of progress in education research? *Educational Researcher*, 41(1), 16-25.
- Artigue, M. (2002). Ingénierie didactique : Quel rôle dans la recherche didactique aujourd'hui? *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation*, 8(1), 59-72. <https://doi.org/10.3406/dsedu.2002.1010>
- Astolfi, J.-P. (2014). *La saveur des savoirs. Disciplines et plaisir d'apprendre*. Paris : ESF
- Astolfi, J.-P. (2014). *La saveur des savoirs. Disciplines et plaisir d'apprendre*. Paris: esf.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y., et Toussaint, J. (2008). *Les mots clés de la didactique: repères, définitions, bibliographies*. Bruxelles: De Boeck Université.

- Astolfi, J.-P., et Develay, M. (1989). *La didactique des sciences : « Que sais-je? »*. n° 2448. Presses universitaires de France.
- Astolfi, J.-P., et Peterfalvi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *ASTER*, (16), 103-140.
- Aumont, B. et Mesnier P.M., (1992). *L'acte d'apprendre*, Paris : PUF
- 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.
- Azzi, M., Chaoui, A., et Sleiman, R. (2014). *Chimie EB9*. Liban : School Press.
- Bachelard, G., (1938/2004). *La formation de l'esprit scientifique*, Paris : Vrin
- Bächtold, M. (2012). Les fondements constructivistes de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation. *Tréma*, (38). Consulté à l'adresse <http://trema.revues.org/2815>
- 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*. NewYork and London : Routledge
- 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*, (25).
- Barlet, R., et Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *ASTER*, (18).
- Baviskar, S. N., Hartle, R. T., et Whitney, T. (2009). Essential Criteria to Characterize Constructivist Teaching: Derived from a review of the literature and applied to five constructivist-teaching method articles. *International Journal of Science Education*, 31(4), 541-550. <https://doi.org/10.1080/09500690701731121>
- Bélangier, M., et De Serres, M. (1998). Les erreurs langagières en mathématiques. Consulté 15 mars 2019, à l'adresse : <http://correspo.ccdmd.qc.ca/index.php/document/lenseignement-de-la-syntaxe-serait-il-donc-inutile/les-erreurs-langagieres-en-mathematiques/>

- Bélangier, M., et Verreault, J.-S. (2008). Mole : étude détaillée. Consulté 15 mars 2019, à l'adresse https://www.pistes.fse.ulaval.ca/sae/?onglet=contenuetno_version=2164
- Bell, P. (2010). On the Theoretical Breath of Design-Based Research in Education. *Educational Psychologist*, 39(4), 243–253.
- Bernard, S., Clément, P., et Carvalho, G. (2007). Méthodologie pour une analyse didactique des manuels scolaires, et sa mise en œuvre sur un exemple. Dans M. Lebrun, *Le manuel scolaire: d'ici et d'ailleurs, d'hier à demain*. Presses de l'Université du Québec.
- Bêty, M.-N. (2009). Les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire : état de la question.
- BIPM(Bureau International des Poids et Mesures), (2006), *The International System of Units* (8th edition). France, Sevres consulté en novembre 2018 sur https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf.
- BIPM(Bureau International des Poids et Mesures), (2006), *The International System of Units* (9th edition). France, Sevres consulté en novembre 2018 sur <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2018.pdf>
- Bisaillon, N. (2005). Enseignement de la résolution de problèmes arithmétiques à des élèves du 3^e cycle du primaire présentant des difficultés d'apprentissage.
- Blain, R. (1993). L'enseignement stratégique. *Québec français*, 88, 50-53.
- Boilevin, J.-M. (2013). *Rénovation de l'enseignement des sciences physiques et formation des enseignants. Regards didactique*. Bruxelles: 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
- Bouraoui, K., et Chastrette, M. (1999). Conceptions d'élèves et d'étudiants français et tunisiens sur la conduction dans les piles électrochimiques. *Didaskalia*, (14), 39-60.
- Braun, A. (2010). Les manuels... de grain à moudre pour la recherche en éducation. *Éducation et Formation*, (292), 7–12.
- Bressoux, P. (1994). Les recherches sur les effets-écoles et les effets-maitres. *Revue Française de Pédagogie*, (108), 91-137.
- Bressoux, P. (2001). Réflexions sur l'effet-maitre et l'étude des pratiques enseignantes. *Revue internationale des Sciences de l'Éducation*, (5), 35-51.

- Bressoux, P. (2008). Comment favoriser les progrès des élèves ? *Sciences humaines*, (192), 38-40.
- Brousseau, G. (1997). « La théorie des situations didactiques », cours donné lors de l'attribution du titre de docteur *honoris causa* de l'Université de Montréal, consulté le 8 avril 2019 sur <http://www.cfem.asso.fr/actualites/archives/Brousseau.pdf>.
- Brousseau, G. (2009). L'erreur en mathématiques du point de vue didactique. *Tangente Éducation*, (7), 4-7.
- Brousseau, G. (1988). Les différents rôles du maître. *Bulletin de l'A.M.Q. Montréal*, 14-24.
- Brousseau, G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques Grenoble*, 4(2).
- Brousseau, G. (2006). *Épistémologie-et-formation-des-professeurs _1_*. 4.
- Brousseau, G. (2010b). Obstacles épistémologiques, conflits socio-cognitifs et ingénierie didactique Dans *Obstacles épistémologiques, conflits socio-cognitifs et ingénierie didactique* (pp. 277-285). CIRADE Les éditions Agence d'Arc inc.
- Brousseau, G. (2013). Introduction à l'ingénierie didactique. Retrouvé sur le lien <http://guy-brousseau.com/2760/introduction-a-l%E2%80%99ingenierie-didactique-2013/>
- Brousseau, G., Brousseau, N., et Warfield, V. (2001). Une expérience de premier enseignement des statistiques et probabilités. 26^{ème} congrès CIAEM.
- Brousseau, N., et Vásquez-Abad, J. (2005). High-school students' problems learning the concept of mole: A Study to Eventually Get it Right. Dans *18th Biennial CheEd Conference, The University of British Columbia, Vancouver BC, Canada July*.
- Brown, J. S., et Burton, R. R. (1978). Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills. *Cognitive science*, 2(2), 155-192.
- Brownlee, J., Dart, B., Boulton-Lewis, G., et McCrindle, A. (1998). The Integration of Preservice Teachers' Naive and Informed Beliefs about Learning and Teaching. *Asia-Pacific Journal of Teacher Education*, 26(2), 107-120.
- Bru, M. (2001). Étudier les pratiques enseignantes : les raisons d'un choix. *Revue internationale des Sciences de l'Éducation*, (5), 5-7.
- Bru, M. (2002). Pratiques enseignantes : des recherches à conforter et à développer. *Revue française de pédagogie*, (138), 63-73.

- Bru, M., et Talbot, L. (2001). Les pratiques enseignantes : une visée des regards. *Revue internationale des Sciences de l'Éducation*, (5), 9-33.
- Brun, J., Conne, F., Lemoyne, G., et Portugais, J. (1994). La notion de schème dans l'interprétation des erreurs des élèves à des algorithmes de calcul écrit. *Cahiers de la recherche en éducation*, 1(1), 117-132.
- Buès, C. (2000). Histoire du concept de mole (1869-1969) à la croisée des disciplines physique et chimie. *ACTUALITÉ CHIMIQUE*, (10), 39-42.
- Buty, C., et Plantin, C. (Dir.). (2008). *Argumenter en classe de sciences. Du débat à l'apprentissage*. Lyon :INRP
- Calmettes, B. (2008). Quels modèles pour l'analyse de pratiques observées? Exemples en didactique de la physique avec les démarches d'investigation, 11.
- Carbonneau, K. J., Marley, S. C., & Selig, J. P. (2013). A meta-analysis of the efficacy of teaching mathematics with concrete manipulatives. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 380-400. doi: [10.1037/a0031084](https://doi.org/10.1037/a0031084)
- Carbonneau, K. J., & Marley, S. C. (2015). Instructional guidance and realism of manipulatives influence preschool children's mathematics learning. *The Journal of Experimental Education*, 83(4), 495-513. doi: [10.1080/00220973.2014.989306](https://doi.org/10.1080/00220973.2014.989306)
- Castro, C. (2006). *Chimie et savoir*.
- Cauzinille-Marmèche, E., Mathieu, J., et Weil-Barais A., (1985). Raisonnement analogique et résolution de problèmes. *L'année Psychologique*, (85), p. 49-72
- CGPM (2018) *Projet de résolution A retrouvé en décembre 2018 sur <https://www.bipm.org/utls/fr/pdf/CGPM/Draft-Resolution-A-FR.pdf>*
- Charnay, R., et Mante, M. (1991). De l'analyse d'erreurs en mathématiques aux dispositifs de remédiation : quelques pistes ... *Grand N*, (48), 37-64.
- Cheneval-Armand, H. (2010). *Approche didactique de l'enseignement de la prévention des risques professionnels en baccalauréat professionnel*. Aix Marseille.
- Chervel, A., (1998). *La culture scolaire, une approche historique*. Paris : Belin.
- Chevallard, Y. (1997). Questions vives, savoirs moribonds: le problème curriculaire aujourd'hui. *Présenté à Colloque Défendre et transformer l'école pour tous* (p. 3-5)
- Chevallard, Y., et Joshua, M.-A. (1991). *La transposition didactique du savoir savant au savoir enseigné* Grenoble : La pensée sauvage.

- Childs, P. E., et Sheehan, M. (2009). What's difficult about chemistry? An Irish perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, 10(3), 204. <https://doi.org/10.1039/b914499b>
- Cifali, M. (1996). Démarche clinique, formation et écriture. Dans L., Paquay, M., Altet, E., Charlier, et P., Perrenoud (dir.). *Former des enseignants professionnels. Quelles stratégies ? Quelles compétences ?* (p. 119-135). Bruxelles : De Boeck
- Clerk, J.-B., Minder, P., et Roduit, G. (2006). La transposition didactique. Repéré à : <https://lyonelkaufmann.ch/histoire/MHS31Docs/Seance1/TranspositionDidactique.pdf>
- Coleman, J.S., Campbell, E.Q., Hobson, C.J., Mcpartland, J., Mood, A.M., Weinfield, F.D., et York, R. L., (1966). *Equality of educational opportunity*. Washington, DC : US Office of Education
- Conne, F. (1992). Savoir et connaissance dans la perspective de la transposition didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 12(23), 221-270.
- Conne, F. (2004). Problèmes de transposition didactique. *Petit x*, 65, 62-41.
- Conseil de la science et de la technologie. (2004.). La culture scientifique et technique, une interface entre les sciences, la technologie et la société. Consulté 22 mai 2019, à l'adresse <https://www.musees.qc.ca/fr/statistiques/references/la-culture-scientifique-et-technique-une-interface-entre-les-sciences-la-technologie-et-la-societe.-rapport-de-conjoncture-2004-pdf>
- Cormier, C. (2014). *Étude des conceptions alternatives et des processus de raisonnement des étudiants de chimie du niveau collégial sur la molécule, la polarité et les phénomènes macroscopiques*. Université de Montréal.
- Couture, C., Arousseau, É., Levesque, Y., & Tremblay, P. (2017). Collaborer pour développer des pratiques d'enseignement de science et technologie à l'école primaire: des retombées pour la pratique, la recherche et la formation. *Revue hybride de l'éducation*, 1(1), 30-47.
- Couture, C., Dionne, L., Savoie-Zajc, L., et Arousseau, E. (2015). Développer des pratiques d'enseignement des sciences et des technologies : selon quels critères et dans quelle perspective ? *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (11), 109-132. <https://doi.org/10.4000/rdst.1004>

- Crahay, M., (2000). *L'école peut-elle être juste et efficace ? de l'égalité des chances à l'égalité des acquis*. France : De Boeck Université.
- Crête, J., et Imbeau, L. M. (1996). *Comprendre et communiquer la science*. De Boeck Supérieur.
- Daher, M., Kaoukabani, E., Bachir, A-K., Nabhan, F. (2014). *Chimie. 9^{ème} année éducation de base*. Liban: Scientifica.
- De Bièvre, P. (2014). CCQM owes chemists a description of the concept « amount of substance ». *Accreditation and Quality Assurance*, 19(4), 323-325.
- De serres, M. (dir.) Bélanger, M., Piché, M-C., Riopel, M., Staub, C. et De grandpré, C. (2003), *Intervenir sur les langages en mathématiques et en sciences*, Montréal : Collection Astroïde, Modulo Editeur.
- Desgagné, S. (1998). La position du chercheur en recherche collaborative: illustration de médiation entre culture universitaire et culture scolaire. *Recherches qualitatives*, 18,p.77-105
- Deslauriers, J.-P. (1987). L'analyse en recherche qualitative. cahiers de recherche sociologique.
- Dierks, W. (1981). Teaching the mole. *European Journal of Science Education*, 3(2), 145-158.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- Douaire, J. (Coord.) (2004). *Argumentation et disciplines scolaires*. Lyon :INRP.
- Douaire, J. (dir) (2004). *Argumentation et disciplines scolaires*. Paris: Institut national de recherche pédagogique.
- Doyon, A., Pruneau, D., et Langis, J. (2010). Accompagner des enseignants dans la construction de leurs propres stratégies d'éducation aux changements climatiques. Dans C. Couture et L. Dionne, *La formation et le développement professionnel des enseignants en sciences, technologie et mathématiques*. Les Presses de l'Université d'Ottawa (p. 109-130).
- Dreyfus, A., et Mazouz, Y. (1993). L'utilisation judicieuse du langage des graphiques par des élèves de seconde dans le domaine de la biologie. *Les Sciences de l'éducation*, 1-3.
- Duit, R. (2007). Science Education Research Internationally : Conceptions, Research Methods, Domains of Research. *Eurasia Journal of Methematics, Science etTechnology Education*, 3(1), 3-15.
- Dulaurans, T., Calafell, J., et Giacino, M. (2014). *Physique chimie 2de*. Paris: Hachette.

- Dupin, J.-J., et Joshua, S. (1994). Analogie et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, (3), 9-26.
- Duplessis, P. (2011). Le triangle didactique (schéma) : les trois dimensions de la recherche didactique. Consulté 6 mars 2019, à l'adresse <http://lestroiscouronnes.esmeree.fr/outils/le-triangle-didactique-schema>
- Ejersbo, L., Engelhardt, R., Frolunde, L., Hanghoj, T., Magnussen, R., et Misfeldt, M. (2008). Balancing Product Design and Theoretical Insights. 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*. New York and London : Routledge.
- El Khishen, R., Zettunlian, M., Diya, H., et El Ghouli, H. (2000). *Chimie Education de base Neuvième année*. Beyrouth: CNDP.
- Fang, S.-C., Hart, C., et Clarke, D. (2014). Unpacking the Meaning of the Mole Concept for Secondary School Teachers and Students. *Journal of Chemical Education*, 91(3), 351-356. <https://doi.org/10.1021/ed400128x>
- 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.
- Fillon, P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. *ASTER*, (25), 113-141.
- Finbarr, C. et Kelly, A. (2008). Design research and the study of Change : Conceptualizing Individual Growth in Designed settings. 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*. New York and London : Routledge
- Fishman, B., Pennuel, W., Allen, A.-R., Haugen Cheng, B., et Sabelli, N. (2013). Design-Based Implementation Research: Emerging Model for Transforming the relationship of Research and Practice. Dans B. Fishman, W. Pennuel, A.-R. Allen, et B. Haugen Cheng, *Design-Based Implementation Research: Theories, Methods, and Exemplars*. New York : NSSE.
- Friede, A. W., Gabel, D. L., et Samuel, J. (1990). Using Analogs for Chemistry Problem Solving: Does it Increase Understanding? *School Science and Mathematics*, 90(8),

674-682. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1990.tb12046.x>

- 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).
- 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 litterature. *Chemistry Education: Research and Practice*, 3(3), 277-292.
- Gabel, D.L et Bunce, D.M (1994). Research on problem solving : Chemistry dans Gabel (dir.), *Handbook on Science Teaching and Learning. A project of the National Science Teachers Association*. New York : Macmillan.
- 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.
- Gaudreau, L., (2011). *Guide pratique pour créer et évaluer une recherche scientifique en éducation*, Guérin : Québec.
- Gaudreau, L., 2011, *Guide pratique pour créer et évaluer une recherche scientifique en éducation*, Guérin : Québec.
- Gauthier, D. (1998). *La modélisation mathématique dans l'enseignement de la chimie des gaz à des élèves de la cinquième année du secondaire*. Université de Montréal, Montréal.
- Gauthier, C., et Dembélé, M. (2004). Qualité de l'enseignement et qualité de l'éducation: revue des résultats de recherche. *Document préparé pour EFA Global Monitoring Report*.
- Geoffrion, P. (2016). Le groupe de discussion. Dans B. Gauthier et I. Bourgeois (dir.), *Recherche sociale. De la problématique à la collecte de données 6^e édition* (p. 401-425).Canada : Presses de l'Université de Québec.
- Gerard, F.-M. (2010). Le manuel scolaire, un outil efficace, mais décrié. *Recherche et formation*, (292), 13-24.
- Gerard, F.-M. et Roegiers, X. (2003). *Des manuels scolaires pour apprendre. Concevoir, évaluer, utiliser*. Bruxelles : de boeck.
- Gilbert, J. K., et Treagust, D. F. (2009). Macro, submicro, and symbolic representations and the relationship between them: Key models in chemical education. Dans J. K. Gilbert et D. F. Treagust (dir.), *Multiple Representations in Chemistry Education* (p. 1-8). The Netherlands: Springer

- Gill-Pérez, D. (1993). Apprendre les sciences par une démarche de recherche scientifique. *ASTER*, (17).
- Giordan, A., et Pellaud, F. (2004). La place des conceptions dans la médiation de la chimie. *L'actualité chimique*, (280-281), 49-52.
- Giroux, J. (2014). Les difficultés d'enseignement et d'apprentissage des mathématiques. Historique et perspectives théoriques. Dans C. Mary, H. Squalli, L. Theis, et L. Beblois, *Recherches sur les difficultés d'enseignement et d'apprentissage des mathématiques: regard didactique* (p. 11-44). Canada : Presses de l'Université du Québec.
- Giunta, C. J. (2015). The mole an Amount of Substance in Chemistry and Education : Beyond Official Definitions. *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1593-1597.
- Glaserfeld, E. von. (1994). Pourquoi le constructiviste doit-il être radical? *Revue Des Sciences de L'éducation*, 20(1), 21–27.
- Glynn, S. (2007). *The Teaching-With-Analogies Model*. 4.
- Goodstein, M., et Howe, A. C. (1978). The use of concrete methods in secondary chemistry instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 15(5), 361-366.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660150507>
- Gouvernement de Quebec, ministère de l'Éducation. (2001). La formation à l'enseignement- les orientations-les compétences professionnelles.
- 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>
- Gorin, G. (1994). Mole and Chemical Amount: A Discussion of the Fundamental Measurements of Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 71(2), 114.
<https://doi.org/10.1021/ed071p114>
- Granger, N. (2014). *Impacts d'une formation établissant des liens entre les sciences et la cuisine sur l'enseignement des sciences au primaire*. Université de Montréal.
- Guisasola Aranzábal, J., Azcona, R., et Furió-Mas, C. (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.
- Hashweh M.B., (1996). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, vol.8, n3, p. 229-249.

- Hattie, J. (2009). *Visible Learning: A synthesis of over 800 metaanalyses relating to achievement*. New York: Routledge.
- 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. In D. Heywood et J. Parker, *The Pedagogy of Physical Science* (Vol. 38, p. 39-64). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5271-2_3
- Hofstein, A., Maoz, N., et Rishpon, M. (1990). Attitudes Towards School Science: A Comparison of Participants and Nonparticipants in Extracurricular Science Activities. *School Science and Mathematics*, 90(1), 13-22.
- Hofstein, A., et Lunetta, V.N. (2004). The laboratory in science education : foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88 (1), p. 28-54
- Institut national de recherche pédagogique (France)., et Laboratoire interuniversitaire de recherche en éducation scientifique et technologique (Paris). (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris: INRP.
- Institut de recherche sur l'enseignement des mathématiques, [IREM], (2013). *RAPPORT_2013-2014.pdf*. Consulté à l'adresse http://www.irem.univ-mrs.fr/IMG/pdf/RAPPORT_2013-2014.pdf
- IUPAC, B. J. (2009). *IUPAC/ICTNS meeting in Glasgow, see minutes 8.2* (p. 169). Consulté à l'adresse https://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/standing/ictns/ICTNS_09other-reports.pdf
- Jansoon, N., Coll, R., et Somsook, E. (2009). Understanding Mental Models of dilution in Thai Students. *International Journal of Environmental et Science Education*, 4(2), 147-168.
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701-705
- Joshua, S., et Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : Presses universitaires de France.
- Joshua, S. (1996). Le concept de transposition n'est-il propre qu'aux mathématiques? Dans C. Raisky et M. Caillot, *Au-delà des didactiques, le didactique*. Paris, Bruxelles : De Boeck.

- Kahn, S. (2010). *Pédagogie différenciée*. Bruxelles : De Boeck.
- Kalali, F. (2007). Rapport au savoir: bilan sur la place du sujet dans les différents travaux. *The Journal of head trauma rehabilitation*, 21(5), 398–402.
- Kali, Y. (2008). The Design Principles Database as a Means for Promoting Design-Based Research. 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*. New York and London : Routledge.
- Karwera, V. (2012). *La transposition didactique du concept de citoyenneté à travers des pratiques d'enseignement de l'histoire au secondaire*. Université de Québec à Chicoutimi.
- Kelly, A., Baek, J., Lesh, R., et Bannan-Ritland, B. (2008). Enabling Innovations in Education and Systematizing their impact. 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*. New York and London : Routledge.
- Khzami, S. E., Agorram, B., Selmaoui, S., Clement, P., El Hage, F., Bernard, S., et Berger, D. (2010). L'éducation à la santé: analyse comparative des manuels scolaires de biologie de 3 pays méditerranéens. *Education et Formation*, 57-67.
- Kuhn, T. S. (1972). La structure des révolutions scientifiques.
- 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.
- Kuhn, D. J. (1972). A study of information acquisition in individualized instruction. *Science Education*, 56(4), 539-545. <https://doi.org/10.1002/sce.3730560413>
- Larousse. (2014). Didactique. Consulté à l'adresse <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/didactique/25365>
- Legay, J-M. (1997). *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*. Paris :INRA
- Legendre, M.-F. (1994). Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire : un état de la question. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(4), 657. <https://doi.org/10.7202/031761ar>
- Legendre, R. (2005). Dictionnaire actuel de l'éducation dir. de Réналd Legendre.

- Lenoir, Y. (2009). L'intervention éducative, un construit théorique pour analyser les pratiques d'enseignement. *Nouveaux cahiers de la recherche en éducation*, 12(1), 9-29.
- Leray, C., et Bourgeois, I., (2016), l'analyse de contenu. Dans B. Gauthier et I. Bourgeois, *Recherche Sociale de la problématique a la collecte des données* (6^e édition, 427-454). Canada : Presses de l'Université du Québec
- Levy, J. (2015). *Chemistry in 100 Numbers* Angleterre : Quid Publishing.
- 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.
- Maire, P., et Robinson, A.-F. (2016). Transposition. *Le petit Larousse Illustre* (2016th ed.). Paris
- Marlot, C., et Toullec-Thery, M. (2014). Normes professionnelles et épistémologie pratique de l'enseignant: un point de vue didactique. *Revue canadienne de l'éducation*, 37(4), 1-32.
- Martinand, J.-L. (1985). Sur la caractérisation des objectifs de l'initiation aux sciences physiques. *Aster*, (1), 141-153.
- Martinand, J.-L. (1986). *France et transformer la matière*. Bern : P. Lang
- Martinand, J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations? *Didaskalia*, (2), 89-99.
- Martinand, J. L. (1996). Introduction à la modélisation. *Actes du séminaire des didactiques des disciplines technologiques*, 1-12.
- Martinand, J.-L. (2010). Schémas didactiques pour la modélisation en sciences et technologies. *Spectre*, (40), 20-24.
- Martinand, J.-L., Astolfi, J.-P., Chomat, A., Drouin, A.-M., Genzling, J.-C., Larcher, C., ... Weil-Barais, A. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (INRP).
- Maulini, O. (2004). Faire le programme ou faire son métier? *Résonances*.
- Mckenney, S., et Reeves, T. (2012). *Conducting educational design research* (Routledge). New York.
- Mercier, A. (2002). La transposition des objets d'enseignement et la définition de l'espace didactique, en mathématiques. *Revue Française de Pédagogie*, (141), 135-171.

- Merrill, D. (2007). First principles of instruction: a SYNTHESIS. In R. Reiser et Dempsey (Eds.), *Trends and issues in instructional design and technology* (p.62-71). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education
- Meyer, J., et Land, R. (2006). *Overcoming barriers to student understanding: Threshold concepts and troublesome knowledge*. Routledge.
- Minier, P., et Gauthier, D. (2006). Représentations des activités d'enseignement-apprentissage en sciences et liens avec les stratégies pédagogiques déployées par des enseignants du primaire. *Journal International sur les Représentations Sociales*, 3(1), 35-46.
- Mingat, A. et Suchaut, B. (2000). *Les systèmes africains. Une analyse économique comparative*. Bruxelles: De Boeck
- Minner, D. D., Levy, A. J., et Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction—what is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474-496. <https://doi.org/10.1002/tea.20347>
- Monod-Ansaldi, R., Prieur, M., Vince, J., Fontanieu, V., et Perret, J.-P. (2011). Conception de l'enquête et méthodologie d'analyse des données, 151.
- Morge, L. et Boilevin, J.-M. (2007). *Séquences d'investigation en physique-chimie, Collège, Lycée*. Clermont-Ferrand : CRDP d'Auvergne.
- Morgue, L. (2003a). Les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulaire. *Didaskalia*, 23, 102-132
- Morgue, L. (2008). La simulation croisée pour accéder aux connaissances professionnelles didactiques locales (LPCK) acquises par l'expérience. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or Conceptual Profile change? *Science et Education*, 4(3), 267-285. <https://doi.org/10.1007/BF00486624>
- Mortimer, E. F., Scott, P., do Amaral, E. M. R., et El-Hani, C. N. 2014 ; Conceptual Profiles: Theoretical-Methodological Bases of a Research Program (Vol.42): Springer Netherlands
- Moss, K., et Pabari, A. (2010). The mole misunderstood. *New Directions in the Teaching of Physical Sciences*, (6), 77-86.

- National Research Council [NRC]. (1996). *National science education standards*. Washington: National Academy press. Consulté en mai 2019 sur : <https://www.nap.edu/read/4962/chapter/1>
- 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, 133-162.
- Noverraz, J.-C. (2007). La dimension épistémologique en didactique des sciences. *La Revue Pédagogique Prisme de la HEP de Lausanne*, 6.
- O'Neill, K. (2012). Designs that fly: what the history of aeronautics tells us about the future of design-based research in education. *International Journal of Research et Method in Education*, 35(2), 119-140.
- Organisation de coopération et de développement économique [OCDE] (2014). *Regards sur 4-fr l'éducation 2014: les indicateurs de l'OCDE*. (2014). Consulté à l'adresse <http://dx.doi.org/10.1787/eag-201>
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: A Possible Mechanism for Conceptual Change and Belief Revision. *Educational Psychologist*, 44(1), 20-40. <https://doi.org/10.1080/00461520802616267>
- 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.
- Paun, E. (2006). Transposition didactique : un processus de construction du savoir scolaire. *Carrefours de l'éducation*, 2(22), 3-13.
- Perrenoud, P. (1998). « La transposition didactique à partir de pratiques : des savoirs aux compétences ». *Revue des sciences de l'éducation*, 24(3), 487-514.
- Pérèz-Roux, T. (2007). Accompagnement des enseignants en formation initiale. Le point de vue des formés sur la relation tuteur-stagiaire. *Recherche & formation*, n° 55(2).

- Pérez-Roux, T., (2010). Quelle prise en compte du Sujet dans la formation des enseignants ? Enjeux et limites d'une approche clinique. Dans Baillat et al., *La formation des enseignants en Europe* (p. 127-138). Bruxelles: De Boeck
- Peterfalvi, B. (1997). L'identification d'obstacles par les élèves. *Aster, 1997, 24" Obstacles: travail didactique"*.
- Philippe, J. (2010). *Fabriquer le savoir enseigné*. Bruxelles : De Boeck.
- Porlan, R., Azcarate, P., et Martin del Pozo, R. (1998). Les champs de recherche professionnelle : une proposition pour former des enseignants. Dans A. Giordan, J.-L. Martinand, et D. Raichvarg, (Eds), *Formation à la médiation et à l'enseignement. Enjeux, pratiques, acteurs. Actes des XXe Journées Internationales sur la communication, l'éducation et la culture scientifique et industrielles* (p.95-99). Paris : LIREST
- Portugais, J. (1995). *Didactique des mathématiques et formation des enseignants*. Bern : Peter Lang
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., et Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education, 66*(2), 211-227. <https://doi.org/10.1002/sci.3730660207>
- Potvin, P. (2019). *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école. Épistémologie, didactique, sciences cognitives et neurosciences au service de l'enseignant*. Québec: Les Presses de l' Université Laval.
- Potvin, P. (2011). *Manuel d'enseignement des sciences et de la technologie pour intéresser les élèves du secondaire*. Québec : MultiMondes.
- Potvin, P., Sauriol, É., et Riopel, M. (2015). Experimental evidence of the superiority of the prevalence model of conceptual change over the classical models and repetition. *Journal of Research in Science Teaching, 52*(8), 1082-1108. <https://doi.org/10.1002/tea.21235>
- Projet Sophia. (2009). Formation des enseignants : un exemple de recherche-action: Chypre, France, France, République tchèque, Slovénie. *Revue internationale d'éducation de Sèvres, (51)*, 47-58.
- Quessada, M.-P. (2008). *L'enseignement des origines d'Homo sapiens, hier et aujourd'hui, en France et ailleurs : programmes, manuels scolaires, conceptions des enseignants*.

Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00353971/document>

- Quessada, M.-P., et Clément, P. (2013). L'évolution humaine dans les programmes et les manuels scolaires de science français de 1994 à aujourd'hui : interactions entre connaissances, valeurs et contexte socioculturel. Dans *L'Actualité de la Recherche en Éducation et Formation (AREF-AECSE)* (pp. 14-pages). Université Montpellier 3/AREF.
- Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I., et Lahanier-Reuter, D. (2013). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. Paris, Bruxelles : De Boeck
- Riquois, E. (2010). Evolutions méthodologiques des manuels et matériels didactiques complémentaires en FLE: De la méthode traditionnelle a la perspective actionnelle. *Recherche et Formation*, (292), 129–142.
- Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Walberg-Henriksson, H., et Hemmo, V. (2007). L'enseignement scientifique aujourd'hui: une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe. *Commission européenne/Bruxelles. [Rapport en ligne] Disponible sur <http://ec.europa.eu>*.
- Rocha-Filho, R. C. (2011). Reproposition of numerosity as the SI base quantity whose unit is the mole. *Accreditation and Quality Assurance*, 16(3), 155-159.
<https://doi.org/10.1007/s00769-011-0752-7>
- 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.
- Rollnick, M., Bennett, J., Rhemtula, M., Dharsey, N., et Ndlovu, T. (2008). The place of subject matter knowledge in pedagogical content knowledge: A case study of South African teachers teaching the amount of substance and chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 30(10), 1365-1387.
<https://doi.org/10.1080/09500690802187025>
- Ruffenach, M., et Decroix, S. (2010). *Physique Chimie 2de*. Paris: Bordas
- Sanders, W.L., et Horn, S. P., (1998). Research findings from the Tennessee Value-Added Assessment System (TVAAS) Database : Implications for Educational Evaluation and Research. *Journal of Personnel Evaluation in Education* (12),3. p.247-256
- Santerre, L., Bergeron, A., Moreau, C., Plourde, C., Hamel, K., Rouge, A., ... et nationale du Québec, B. (2004). Conseil de la science et de la technologie.

- Sarantopoulos, P., et Tsaparlis, 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.
- Sarmant, J-P. (2001). Du questionnement à la connaissance en passant par l'expérience. *Bulletin de l'Union des physiciens*, 830, 165-171
- Sarremejane, P., et Lemonie, Y. (2011). Expliquer les pratiques d'enseignement-apprentissage: un bilan épistémologique. *Revue des sciences de l'éducation*, 46(2), 285-301.
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational researcher*, 15(2), 4-14
- Schwartz, D., Chang, J., et Martin, L. (2008). Instrumentation and Innovation in Design Experiments Taking the Turn Towards Efficiency. 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*. New York and London : Routledge.
- Schweingruber, H. A., Quinn, H., Keller, T. E., et Pearson, G. (2013). A framework for K-12 science education : looking toward the future of science education. *The bridge-Linking engineering and society*, 43(1), 43-50
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational researcher*, 15(2), 4-14.
- Shymansky, J. A., et Kyle, W. C. (1992). Establishing a research agenda: critical issues of science curriculum reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(8), 749-778. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290803>
- Silberberg, M.S. (2013). *Principles of General Chemistry*, 3rd edition. New York : McGraw-Hill
- Sloane, F., Holding, B., et Kelly, A. (2008). Longitudinal Analysis and Interrupted Time Series Designs: Opportunities for the Practice of Design Research. 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*. New York and London : Routledge.
- Spiral, (2016). Département de Science Politique- Université de Liège. retrouvé sur le lien : <http://www.spiral.ulg.ac.be/fr/outils/focus-group/>

- Staver, J. R., et Lumpe, A. T. (1993). A content analysis of the presentation of the mole concept in chemistry textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(4), 321-337. <https://doi.org/10.1002/tea.3660300402>
- Steinberg, G., Balicki, S., Banks, G., Clinchot, M., Cullipher, S., Huie, R., ... Sevian, H. (2014). Collaborative Professional Development in Chemistry Education Research: Bridging the Gap between Research and Practice. *Chemical Education*, (91), 1401–1408.
- Strömdahl, H., Tulberg, A., et Lybeck, L. (1994). The qualitatively different conceptions of 1 mol. *International Journal of Science Education*, 16(1), 17-26.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplets". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Talbot, L. (2012). Les recherches sur les pratiques enseignantes efficaces. Synthèse, limites et perspectives. *Questions Vives. Recherches en éducation*, (Vol.6 n°18), 129-140.
- Tardy, M. (1994.). La transposition didactique. Abernot, Y., Altet, M., Astolfi, J. P., Barth, B. M., Berbaum, J., Bru, M., ... et Houssaye, J. (1994) *La pédagogie: une encyclopedie pour aujourd'hui*. Paris ESF (p. 51-60).
- Tavignot, P. (1995). A propos de la transposition didactique en didactique des mathématiques. *Revue de Recherches en Education*, (15), 31-60.
- The Design-Based Research Collective. (2003). An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *American Educational Research Association*, 32(1), 5–8.
- Thouin, M. (2017a). *Enseigner les sciences et les technologies au préscolaire et au primaire*. Québec : MultiMondes
- Thouin, M. (2017b). L'épistémologie et la recherche en didactique : Les visées des sciences et les modèles. *Canadian Journal for New Scholars in Education/ Revue canadienne des jeunes chercheuses et chercheurs en éducation*, 8(1). Consulté à l'adresse <https://journalhosting.ucalgary.ca/index.php/cjnse/article/view/42174>
- Thouin, M. (2014). *Réaliser une recherche en didactique*. Québec : MultiMondes
- Thouin, M. (2015). *Tester et enrichir sa culture scientifique et technologique*. Québec : MultiMondes
- Tro, N.J. (2013). *Chemistry : A Molecular Approach*, 2nd edition. Boston : Prentice Hall
- Trudel, L., et Metioui, A. (2010). Étude exploratoire d'une démarche de formation et de ses effets sur la planification d'une stratégie d'enquête scientifique en physique par de

- futurs enseignants. Dans C. Couture et L. Dionne, *La formation et le développement professionnel des enseignants en sciences, technologie et mathématiques*. La Presse de l'Université d'Ottawa.
- Vergnaud, G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques*, 10(2-3) p. 133-169
- Vergnaud, G. (2011). Au fond de l'action, la conceptualisation. In J.-M. Barbier, *Savoirs théoriques et savoirs d'action*. France : Education et Formation (p. 275-292)
- Verhaeghe, J.-C., Wolfs, J. L., Simon, X. et Compère, D. (2004). *Pratiquer l'épistémologie. Un manuel d'initiation pour les maîtres et formateurs*. Bruxelles : de boeck.
- Vermersch, P. (2014). *L'entretien individuel: nouvelle édition enrichie d'un glossaire*. Paris : ESF
- Vial, M., et Caparros-Mencacci, N. (2007). *L'accompagnement professionnel? Méthode a l'usage des praticiens exerçant une fonction éducative*. Bruxelles : De Boeck.
- Vilches, A., et Gil-Pérez, D. (2012). The supremacy of the constructivist approach in the field of physics education : myths and real challenges. *Tréma*, (38).
- Vogel, D. (1992). Atomless Chemistry? Why scientists believe what they cannot actually see. *The Science Teacher*, 56 (8). 32-35.
- Vosniadou, S., et Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24(4), 535-585.
- Wang, M., Heartel, G., et Walberg, H. (1994). Qu'est-ce qui aide l'élève à apprendre ? *Vie pédagogique* (90), set-oct.,p.45-49
- Weil-Barais, A., et Goffard, M., (2005). Introduction. Dans m. Goffard et A. Weil-Barais (dir.), *Enseigner et apprendre les sciences. Recherches et pratiques* (p. 13-18). Paris : Armand Colin
- Weiss, J. (1997). Enseignants et chercheurs en éducation : Quelles collaborations ? *Recherches* (97.108), décembre, 1-13.
- Wenger, E. (1998). *Communities of practice : Learning, meaning and identity*. Cambridge, Grande Bretagne : Cambridge University Press.
- Williams, L. V. (1991). *Deux cerveaux pour apprendre: le droit et le gauche*. Editions d'Organisation,.

ANNEXES

Annexe 1 : Le certificat d'éthique de la recherche

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (C PER), selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche suivant et conclu qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal.


Projet	
Titre du projet	Impact d'une formation, qui porte sur le concept de mole, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur la réduction des obstacles didactiques chez leurs élèves
Étudiante requérant	Simone Abou Halloun Candidate au doctorat, Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation, Université de Montréal
Financement	
Organisme	Non financé
Programme	--
Titre de l'octroi si différent	--
Numéro d'octroi	--
Chercheur principal	--
No de compte	--
Approbation reconnue	
Approbation émise par	non
Certificat:	s.o.

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au C PER qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique.

Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au C PER.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du C PER.


Jean Poupert, Président
Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche
Université de Montréal

15 juin 2017
Date de délivrance

1 juillet 2018
Date de fin de validité

27 septembre 2018

Madame Simone Abou Halloun
Candidate au doctorat
Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation

OBJET: Approbation éthique (renouvellement)

Mme Simone Abou Halloun,


Le *Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPER)* a étudié votre demande de renouvellement pour le projet de recherche intitulé « Impact d'une formation, qui porte sur le concept de mole, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur la réduction des obstacles didactiques chez leurs élèves » et a délivré le certificat d'éthique demandé suite à la satisfaction des exigences qui prévalent. Vous trouverez ci-joint une copie numérisée de votre certificat; copie également envoyée à votre directeur/directrice de recherche et à la technicienne en gestion de dossiers étudiants (TGDE) de votre département.

Notez qu'il y apparaît une mention relative à un suivi annuel et que le certificat comporte une date de fin de validité. En effet, afin de répondre aux exigences éthiques en vigueur au Canada et à l'Université de Montréal, nous devons exercer un suivi annuel auprès des chercheurs et étudiants-chercheurs.

De manière à rendre ce processus le plus simple possible et afin d'en tirer pour tous le plus grand profit, nous avons élaboré un court questionnaire qui vous permettra à la fois de satisfaire aux exigences du suivi et de nous faire part de vos commentaires et de vos besoins en matière d'éthique en cours de recherche. Ce questionnaire de suivi devra être rempli annuellement jusqu'à la fin du projet et pourra nous être retourné par courriel. La validité de l'approbation éthique est conditionnelle à ce suivi. Sur réception du dernier rapport de suivi en fin de projet, votre dossier sera clos.

Il est entendu que cela ne modifie en rien l'obligation pour le chercheur, tel qu'indiqué sur le certificat d'éthique, de signaler au CPER tout incident grave dès qu'il survient ou de lui faire part de tout changement anticipé au protocole de recherche.

Nous vous prions d'agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs,


Sylvie De Saedeleer, conseillère en éthique de la recherche
Comité plurifacultaire en éthique de la recherche (CPER)
Université de Montréal
AME/

c. c. Gestion des certificats, BRDV, Marcel Thouin, professeur titulaire, Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation
Nicole Gaboury
p. j. Certificat CPER-17-051-D(1)

adresse postale
3333 Queen-Mary, bureau 220

www.cper.umontreal.ca

Téléphone : 

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE
- 1er renouvellement -

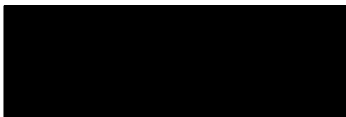
Le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPEP), selon les procédures en vigueur et en vertu des documents relatifs au suivi qui lui a été fournis conclut qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal

Projet	
Titre du projet	Impact d'une formation, qui porte sur le concept de mole, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur la réduction des obstacles didactiques chez leurs élèves
Requérant(e)s	Simone Abou Halloun (██████████) Candidate au doctorat, Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation Université de Montréal
Financement	
Organisme	Non financé
Programme	--
Titre de l'octroi si différent	--
Numéro d'octroi	--
Chercheur principal	--
No de compte	--

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au CPEP qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique. Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au CPEP.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du CPEP.



Sylvie De Saedeleer, conseillère en éthique de la recherche
Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche
Université de Montréal

25 avril 2018 Date de délivrance du renouvellement ou de la réémission*	1er septembre 2019 Date du prochain suivi
15 juin 2017 Date du certificat initial	1er septembre 2019 Date de fin de validité

*Le présent renouvellement est en continuité avec le précédent certificat

15 juin 2017

Madame Simone Abou Halloun
Candidate au doctorat
Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation

OBJET: Approbation éthique

Mme Simone Abou Halloun,

Le *Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPER)* a étudié le projet de recherche intitulé « Impact d'une formation, qui porte sur le concept de mole, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur la réduction des obstacles didactiques chez leurs élèves » et a délivré le certificat d'éthique demandé suite à la satisfaction des exigences précédemment émises.

Notez qu'il y apparaît une mention relative à un suivi annuel et que le certificat comporte une date de fin de validité. En effet, afin de répondre aux exigences éthiques en vigueur au Canada et à l'Université de Montréal, nous devons exercer un suivi annuel auprès des chercheurs et étudiants-chercheurs.

De manière à rendre ce processus le plus simple possible et afin d'en tirer pour tous le plus grand profit, nous avons élaboré un court questionnaire qui vous permettra à la fois de satisfaire aux exigences du suivi et de nous faire part de vos commentaires et de vos besoins en matière d'éthique en cours de recherche. Ce questionnaire de suivi devra être rempli annuellement jusqu'à la fin du projet et pourra nous être retourné par courriel. La validité de l'approbation éthique est conditionnelle à ce suivi. Sur réception du dernier rapport de suivi en fin de projet, votre dossier sera clos.

Il est entendu que cela ne modifie en rien l'obligation pour le chercheur, tel qu'indiqué sur le certificat d'éthique, de signaler au CPER tout incident grave dès qu'il survient ou de lui faire part de tout changement anticipé au protocole de recherche.

Nous vous prions d'agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs,



Jean Poupart, Président
Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPER)
Université de Montréal

JP/RS/rs
c.c. Gestion des certificats, BRDV
Marcel Thouin, professeur titulaire, Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation
Nicole Gaboury
p.j. Certificat CPER-17-051-D

adresse postale
3744 Jean-Brillant, B-430-8
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal QC H3C 3J7
www.cper.umontreal.ca

Téléphone 


FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

« Impact d'une formation, qui porte sur le concept de mole, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur la réduction des obstacles didactiques »

Chercheuse étudiante :	Simone ABOU HALLOUN, étudiante au doctorat, Département de didactique, Université de Montréal
Directeur de recherche :	Marcel THOUIN, professeur titulaire, Département de didactique, Université de Montréal

Cette recherche n'est pas subventionnée.

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche. Avant d'accepter, veuillez prendre le temps de lire ce document présentant les conditions de participation au projet. N'hésitez pas à poser toutes les questions que vous jugerez utiles à la personne qui vous présente ce document.

A) RENSEIGNEMENTS AUX PARTICIPANTS

1. Objectifs de la recherche

Cette recherche vise à étudier l'impact d'une formation, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, qui porte sur l'enseignement du concept de mole. Elle cherche notamment à examiner dans quelle mesure 1) les conflits cognitifs auxquels les enseignants sont confrontés lors de cette formation peuvent faire évoluer leurs conceptions alternatives et 2) une démarche réflexive portant sur leurs méthodes d'enseignement leur permet d'anticiper les divers types de difficultés cognitives que pourraient rencontrer leurs élèves dans leur apprentissage et leur permet de réduire les obstacles didactiques qui pourraient nuire à l'apprentissage du concept de mole par leurs élèves.

2. Participation à la recherche

Votre participation consiste à :

- 1) Participer à un groupe de discussion dont le thème principal serait l'enseignement du concept « la mole » au secondaire. Les participantes à ce groupe de discussion sont l'étudiante chercheuse et les enseignantes.
- 2) Participer à des rencontres avec l'étudiante chercheuse pour construire, évaluer et améliorer la séance d'enseignement du concept « la mole » au secondaire. (3 rencontres sont prévues)
- 3) Animer la séance d'enseignement dans votre classe. Des enregistrements vidéo pourraient avoir lieu durant ces séances, après votre consentement.
- 4) Accorder une entrevue à l'étudiante chercheuse sur les effets professionnels de la formation.

Les groupes de discussions, les rencontres et les entrevues auront lieu à l'école Saint Joseph des Filles de la Charité et les horaires seront fixés selon la disponibilité des participantes. À noter que la durée du groupe de discussion est presque 3 heures et la durée d'un entretien est 45 minutes. Le nombre de séances d'enseignement sera entre 4 à 6 séances. La durée totale de la participation sera pour une durée de un mois presque.

Des enregistrements vidéo et audio auront lieu durant l'entretien d'explicitation et le groupe de discussion pour faciliter les transcriptions.

Les documents produits durant les rencontres seront récoltés par l'étudiante chercheuse pour des fins d'analyse. Ces données ne seront pas considérées si elles ne complètent pas de façon intéressante les autres activités de la recherche.

3. Risques et inconvénients

Il n'y a pas de risque particulier à participer à ce projet. J'espère que le temps consacré aux rencontres ne sera pas un inconvénient et que vous y retrouverez un moyen de développement professionnel. À noter que le nombre de séances d'enseignement ne devrait pas dépasser le nombre prévu selon la progression des programmes. .

4. Avantages et bénéfices

Cette recherche vise à rendre l'enseignement du concept de la moie plus efficace tout en gardant un impact positif sur votre parcours professionnel.

5. Confidentialité

Aucune information permettant de vous identifier d'une façon ou d'une autre ne sera publiée. La formation consiste à partager des connaissances professionnelles et disciplinaires entre les enseignants et la chercheuse. Chaque participant à la recherche se verra attribuer un faux nom et seule la chercheuse étudiante pourra connaître son identité.

Les données seront conservées dans un lieu sûr. Les enregistrements seront transcrits, analysés par des méthodes qualitatives pour répondre à la question de recherche et seront détruits, 7 ans après la fin de la recherche. La chercheuse étudiante invite les participants à préserver la teneur des propos qui seront échangés lors des groupes de discussion ainsi que l'identité des participants qui y tiendront part.

Certains segments, anonymes, pourraient être utilisés comme arguments ou exemple dans la présentation et l'analyse des résultats.

6. Compensation

Pour vous remercier de votre participation, 20 \$ Ca vous seront remis après chaque rencontre compensée soit: le groupe de discussions et les 3 rencontres des enseignantes avec l'étudiante chercheuse et ce pour un maximum de 80\$.

7. Droit de retrait

Votre participation à ce projet est entièrement volontaire et vous pouvez à tout moment vous retirer de la recherche sur simple avis verbal et sans devoir justifier votre décision, sans conséquence pour vous. Si vous décidez de vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec la chercheuse au numéro de téléphone indiqué ci-dessous.

À votre demande, tous les renseignements qui vous concernent pourront aussi être détruits. Cependant, après le déclenchement du processus de publication (thèses, articles), il sera impossible de détruire les analyses et les résultats portant sur vos données. Un résumé simplifié et imprimé des principaux résultats vous sera remis en personne ou par courriel électronique dès la fin de la recherche.

B) CONSENTEMENT

Déclaration du participant

- Je comprends que je peux prendre mon temps pour réfléchir avant de donner mon accord ou non à participer à la recherche.

-
- Je peux poser des questions à l'équipe de recherche et exiger des réponses satisfaisantes.
 - Je comprends qu'en participant à ce projet de recherche, je ne renonce à aucun de mes droits ni ne dégage les chercheurs de leurs responsabilités.
 - J'ai pris connaissance du présent formulaire d'information et de consentement et j'accepte de participer au projet de recherche.
 - Je m'engage à préserver la confidentialité des propos qui seront échangés dans le cadre des groupes de discussion ainsi que l'identité des participants qui y prendront part.

J'accepte que les entretiens, le groupe de discussion ainsi que les rencontres soient enregistrés sous format audio vidéo oui ; non

Signature du participant : _____ Date : _____

Nom : _____ Prénom : _____

Engagement de la chercheuse étudiante

J'ai expliqué au participant les conditions de participation au projet de recherche. J'ai répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées et je me suis assurée de la compréhension du participant. Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au présent formulaire d'information et de consentement.

Signature de la chercheuse : _____ Date : _____

Nom : _____ Prénom : _____

Pour toute question relative à l'étude, ou pour vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec Simone ABOU HALLOUN au numéro de téléphone [REDACTED] / [REDACTED] ou à l'adresse courriel [REDACTED]

Pour toute préoccupation sur vos droits ou sur les responsabilités des chercheurs concernant votre participation à ce projet, vous pouvez contacter le Comité d'éthique de la recherche plurifacultaire par courriel à l'adresse [REDACTED] ou par téléphone au [REDACTED] ou encore consulter le site Web <http://recherche.umontreal.ca/participants>.

Toute plainte relative à votre participation à cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal en appelant au numéro de téléphone [REDACTED] ou en communiquant par courriel à l'adresse [REDACTED] (**l'ombudsman accepte les appels à frais virés**).

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

« Impact d'une formation, qui porte sur le concept de mole, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, sur la réduction des obstacles didactiques »

Chercheuse étudiante :	Simone ABOU HALLOUN, étudiante au doctorat, Département de didactique, Université de Montréal
Directeur de recherche :	Marcel THOUÏN, professeur titulaire, Département de didactique, Université de Montréal

Cette recherche n'est pas subventionnée.

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche. Avant d'accepter, veuillez prendre le temps de lire ce document présentant les conditions de participation au projet. N'hésitez pas à poser toutes les questions que vous jugez utiles à la personne qui vous présente ce document.

A) RENSEIGNEMENTS AUX PARTICIPANTS

1. Objectifs de la recherche

Cette recherche vise à étudier l'impact d'une formation, donnée à des enseignants de chimie du secondaire, qui porte sur l'enseignement du concept de mole. Elle cherche notamment à examiner dans quelle mesure 1) les conflits cognitifs auxquels les enseignants sont confrontés lors de cette formation peuvent faire évoluer leurs conceptions alternatives et 2) une démarche réflexive portant sur leurs méthodes d'enseignement leur permet d'anticiper les divers types de difficultés cognitives que pourraient rencontrer leurs élèves dans leur apprentissage et leur permet de réduire les obstacles didactiques qui pourraient nuire à l'apprentissage du concept de mole par leurs élèves.

2. Participation à la recherche

Votre participation consiste à répondre aux questions concernant le concept mole dans les évaluations proposées et d'accepter que vos réponses soient analysées aux fins de la présente recherche.

3. Risques et inconvénients

Il n'y a pas de risque particulier à participer à ce projet.

4. Avantages et bénéfices

Cette recherche vise à rendre l'enseignement du concept de la mole plus efficace.

5. Confidentialité

Les résultats que vous aurez obtenus aux évaluations me seront transmis de façon anonyme et ils seront conservés dans un lieu sûr. Seuls moi et mon directeur de recherche pourront les consulter. Ils seront détruits 7 ans après la fin du projet.

6. Compensation

Aucune compensation n'est prévue

7. Droit de retrait

Votre participation à ce projet est entièrement volontaire et vous pouvez à tout moment vous retirer de la recherche sur simple avis verbal et sans devoir justifier votre décision, sans conséquence pour vous. Si vous décidez de vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec la chercheuse au numéro de

Ce projet a été approuvé par le comité plurifacultaire d'éthique de la recherche de l'université de Montréal (CPEP-17-051-D)

téléphone indiqué ci-dessous. Cependant, il ne sera pas possible de détruire les données qui vous concernent puisque votre participation est anonyme.

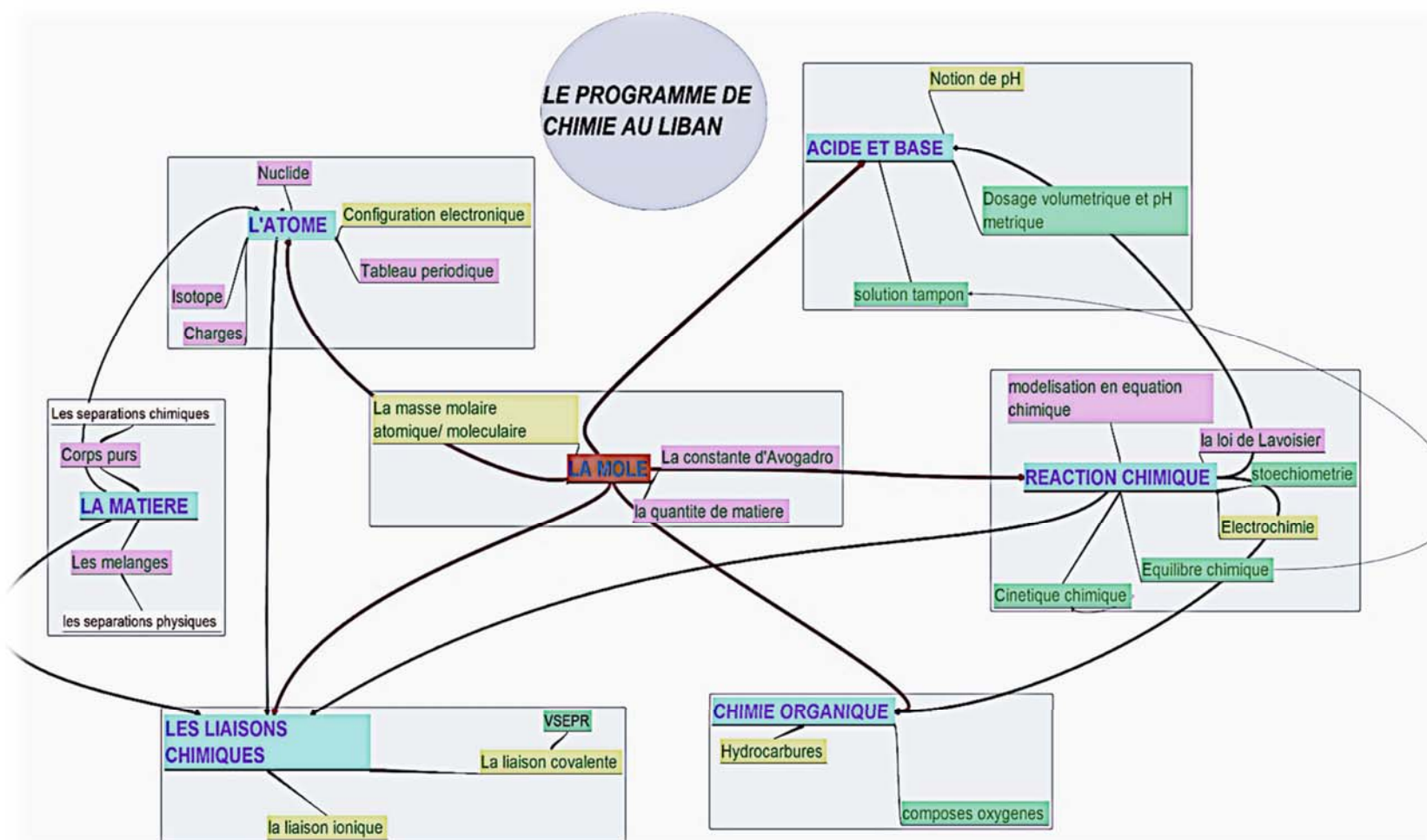
Pour toute question relative à l'étude, ou pour vous retirer de la recherche, veuillez communiquer avec Simone ABOU HALLOUN au numéro de téléphone [REDACTED] / [REDACTED] ou à l'adresse courriel [REDACTED].

Pour toute préoccupation sur vos droits ou sur les responsabilités des chercheurs concernant votre participation à ce projet, vous pouvez contacter le Comité d'éthique de la recherche plurifacultaire, par courriel à l'adresse coer@umontreal.ca ou par téléphone au [REDACTED] ou encore consulter le site Web <http://recherche.umontreal.ca/participants>.

Toute plainte relative à votre participation à cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal en appelant au numéro de téléphone [REDACTED] ou en communiquant par courriel à l'adresse ombudsman@umontreal.ca (**l'ombudsman accepte les appels à frais virés**).

Ce projet a été approuvé par le comité plurifacultaire d'éthique de la recherche de l'université de Montréal (CPER-17-051-D)

Annexe 2 : La mole un concept nœud



**Annexe 3 : La transposition du concept de mole dans les manuels
scolaires**

Article en préparation

RÉSUMÉ

Le manuel scolaire est un matériel didactique intentionnellement utilisé pour améliorer l'efficacité des apprentissages. Mais cet outil imprimé est controversé parce qu'il doit surtout satisfaire à des attentes sociales et pédagogiques et parce que l'épistémologie des concepts transposés n'est pas toujours validée. Cet article présente les résultats de l'analyse de transpositions didactiques, dans des manuels scolaires, du concept de mole, un concept nœud dans l'apprentissage de la chimie.

INTRODUCTION

Les finalités de l'enseignement des sciences physiques, fixées dans la plupart des programmes, consistent à contribuer à la compréhension du monde matériel, à l'acquisition d'une culture scientifique et technologique adaptée à l'évolution de la société actuelle et à la familiarisation avec les carrières dans les domaines scientifiques et techniques. La formation des enseignants et la conception de matériel didactique devraient contribuer à l'atteinte de ces finalités.

L'enseignement des sciences, tout comme celui des autres disciplines, est soutenu par un matériel didactique dont le plus important est le manuel scolaire. Ce dernier est « un outil imprimé, intentionnellement structuré pour s'inscrire dans un processus d'apprentissage, en vue d'en améliorer l'efficacité » (Gerard et Roegiers, 2003, p.10). Ceci dit, le manuel est un matériel didactique controversé, dont l'analyse est devenue un volet important des recherches en sciences de l'éducation. D'une part, le manuel devrait favoriser un apprentissage efficace en couvrant l'essentiel des compétences et des savoirs d'un programme de formation en proposant des activités d'apprentissage variées. D'autre part, la construction des manuels scolaires ne répond pas uniquement à des besoins didactiques et pédagogiques mais à un « appel d'offres ou à un cahier de charges édicté par les pouvoirs publics » (Gerard, 2010, p. 16). Les résultats des analyses des manuels scolaires par des chercheurs comme Bernard, Clement et Carvalho (2007) et Riquois (2010) confirment que leur contenu reflète tout autant le contenu d'un programme que les valeurs et les besoins socioéconomiques de la société.

D'ailleurs, l'orientation des programmes scolaires répond elle-même aux attentes des pouvoirs publics. « Les compétences », concept reconnu dans le monde du travail, forment le socle principal des nouveaux programmes, en réponse à l'évolution technologique et à la mondialisation dans toutes les sociétés. Dans les nouveaux programmes construits selon une approche compétence, l'intérêt est porté à la fois sur le développement d'un savoir, d'un savoir-faire (les capacités) et d'un savoir-être (les habiletés). Ces savoirs se développent à travers une famille de situations qui délimite les compétences visées (Gerard et Roegiers, 2003). Cependant, la transformation des programmes en activités ou en situations d'apprentissage n'est pas évidente (Granger, 2014) et certains concepts nœud, tel que le concept de mole, n'ont pas toujours le mérite, malgré leur importance, d'une unité indépendante dans les nouveaux programmes.

Les difficultés d'apprentissage et d'enseignement en sciences et plus particulièrement du concept de mole, en chimie, peuvent être abordées sous l'angle du triangle didactique dont les sommets sont l'élève, l'enseignant et le savoir. Les difficultés d'apprentissage qui relèvent du rapport de l'élève au savoir découlent des conceptions des élèves et des lacunes dans les processus cognitifs de résolution de problèmes. Les difficultés d'enseignement qui relèvent de la relation enseignant-savoir sont causées par diverses lacunes dans la transposition didactique interne. Enfin, la relation enseignant-élève se caractérise parfois par des lacunes dans le contrat didactique, notamment dans la définition des rôles respectifs de l'enseignant et de l'élève.

Alors qu'une approche constructiviste est explicitement souhaitée dans les nouveaux programmes pour placer l'élève au centre de son apprentissage, les pratiques scolaires ne favorisent pas toujours la compréhension des concepts en sciences et ne stimulent pas tellement l'intérêt des élèves, surtout pour les sciences physiques (Vilches et Gil-Pérez, 2012). Par exemple, il est fréquent que la démarche d'enseignement et d'apprentissage ne tienne pas compte des conceptions alternatives des élèves.

Les conceptions, sont des idées plus ou moins structurées qui s'adaptent à différentes situations, et constituent un système explicatif bien installé qui joue le rôle de « « filtres » pour toute nouvelle information » (Giordan et Pellaud, 2004, p. 49). Les conceptions relatives à

différentes notions non reliées pourraient également émerger sous forme d'obstacles qui possèdent « un caractère plus général et plus transversal » (Astolfi et Peterfalvi, 1993, p.106). En effet, des obstacles épistémologiques peuvent être à l'origine des conceptions relatives à certains concepts.

C'est par exemple le cas du concept de mole. Ostwald avait redéfini ce concept pour réfuter des hypothèses de Dalton et d'Avogadro, qui considéraient la mole comme étant la masse moléculaire ou la masse normale, et aussi pour mieux appréhender les lois de la stœchiométrie à l'échelle macroscopique (Pekdağ, et Azizoğlu, 2013). Cette confusion entre les concepts de masse et de mole se retrouve souvent chez les élèves et dans les discours des enseignants (Furió, Azcona et Guisasola, 2002).

D'ailleurs, la définition de la mole est elle-même problématique. En 1900, Ostwald avait proposé la définition suivante : « la masse d'une substance, exprimée en grammes, numériquement égale à son poids normal ». En 1971, l'IUPAC, l'IUPAP, l'ISO et le SI formulèrent la définition : « la mole est une quantité de matière qui contient un nombre d'entités élémentaires équivalente au nombre d'atomes dans 12 g de carbone C-12 » (Pekdağ, et Azizoğlu, 2013). En 2013, le CGPM³³ proposa la définition suivante : « la mole, de symbole mol, est l'unité dans le SI de la quantité de matière d'une substance contenant des entités élémentaires (atome, molécule, ion). Sa magnitude est déterminée en fixant la valeur numérique de la constante d'Avogadro à $6,02214129 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (dans le SI) ». Giunta (2015) montre que, depuis plus de 40 ans, les manuels scolaires s'en sont tenus à la définition de 1971. Il montre également que les définitions officielles ne sont pas très « didactiques » et ne font pas consensus chez les enseignants. En plus, dans le cas de la mole, l'expression « quantité de matière » pourrait être à l'origine d'un obstacle épistémologique puisque l'IUPAC en propose une définition identique à celle de la masse : « *Base quantity in the system of quantities upon which SI is based* ». La masse est définie dans les manuels de physique comme étant la quantité de matière. Tenir compte de ces obstacles épistémologiques pourraient faciliter les apprentissages des élèves.

³³ CGPM : General conference on weights and measures

Mais les obstacles peuvent être aussi didactiques. Le constructivisme suppose la création, à travers des activités, de schèmes ou de processus cognitifs pertinents, ce qui, en réalité, n'est pas toujours le cas puisque'une réponse correcte de l'élève n'est pas toujours l'indice d'un raisonnement correct ou complet. Par exemple, le concept mole possède deux aspects : un aspect quantitatif et un aspect conceptuel (ou qualitatif). Les réponses des élèves, lorsqu'elles sont justifiées, témoignent parfois de lacunes ou d'incohérences dans la construction de l'un, de l'autre, ou des deux aspects du concept. Tous les cas de figure sont possibles : calculs corrects mais compréhension quantitative et qualitative incomplète ; calculs corrects, compréhension quantitative correcte, compréhension qualitative incomplète ; etc. Par ailleurs, un manque de compréhension de l'aspect conceptuel est souvent associé aux domaines du savoir en chimie : le sous-microscopique, le macroscopique et le symbolique (Pekdağ, et Azizoglu, 2013). L'élève est souvent incapable de créer des liens entre ces trois domaines. La « relation du triplet » (Gilbert et Treagust, 2009) gagne à être enseignée au moyen d'activités de résolution de problème qui s'appuient sur de bonnes analogies et qui visent la construction de modèles par l'élève ainsi que son acquisition d'un langage scientifique.

Le langage scientifique est constitué de trois langages distincts : le langage naturel employé dans les énoncés, le langage symbolique constitué par les symboles et les unités, et le langage graphique constitué par des éléments visuels. Barlet et Plouin (1994) montrent qu'en chimie, « le langage interagit fortement avec le concept [...] ; le langage chimique véhicule un “ déjà-là ” conceptuel très fort par où peuvent pénétrer des ambiguïtés et se renforcer les conceptions » (p.51). Les résultats des recherches de Fillon (1997) corroborent celles de Barlet et Plouin et confirment que l'acquisition des concepts de la chimie ne peut être dissociée du développement d'un langage scientifique correct. Par ailleurs, les langages symbolique et graphique en chimie gardent un degré d'abstraction élevé. L'élève doit distinguer et relier la constitution de la matière à l'échelle macroscopique, qu'il perçoit par ses cinq sens, et sa constitution à l'échelle microscopique, qu'il doit appréhender à travers les modèles. L'élève, devant des situations complexes, a souvent de la difficulté à organiser et structurer les informations. Il finit par mémoriser des formules sans comprendre les concepts sous-jacents ni s'appropriier le langage scientifique (Moss et Pabari, 2010).

La plupart des enseignants auraient de la difficulté à construire eux-mêmes des activités adéquates de résolution de problème au sujet du concept de mole. Ils s'appuient donc sur les activités disponibles dans les manuels scolaires.

Le manuel scolaire est un matériel didactique qui devrait normalement favoriser un apprentissage efficace et conforme aux attentes des programmes. En chimie, deux grands types d'apprentissage sont visés : un apprentissage pratique, qui favorise la construction des concepts et des principes à partir de problèmes de la vie de tous les jours ; un apprentissage théorique, qui transmet directement certains concepts (Moss et Pabari, 2010). Pekdağ, et Azizoğlu (2013) ont analysé les erreurs relatives au concept de mole dans des manuels adoptés aux États Unis, en France et en Turquie. Ils classent ces erreurs en erreurs sémantiques et en difficultés didactiques et signalent qu'elles peuvent se retrouver dans les deux types d'apprentissage. Parmi les erreurs sémantiques, ils distinguent : 1) des concepts manquants (confondre l'unité dans le SI, soit « mol », avec le concept « quantité de matière » ; ne pas indiquer la nature de l'entité (ion, atome, molécule ...) ; ne pas distinguer, par le langage approprié, l'échelle microscopique de l'échelle macroscopique) ; 2) des incohérences menant à des confusions entre la quantité de matière, le volume molaire et la masse molaire ; 3) des expressions inappropriées pouvant limiter le concept aux molécules ou aux atomes, et amener à des confusions entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique. Ces erreurs sémantiques sont en elles-mêmes la source de difficultés didactiques puisque l'absence d'erreurs sémantiques semble essentielle pour une bonne appropriation du concept. Moss et Pabari (2010) ont repéré les difficultés d'enseignement et d'apprentissage du concept de mole. Ils ont montré que les manuels scolaires sont parmi les causes de difficultés citées par les élèves du secondaire qui considèrent que le concept de mole y est présenté d'une façon confuse. L'analyse de manuels scolaires mexicains montre aussi que le concept de la « quantité de matière » est expliqué d'une manière superficielle et que la validité scientifique de la façon de la présenter pourrait même être remise en question (Padilla et Furio-Mas, 2008).

L'objectif de cette étude est d'analyser la transposition didactique du concept de mole dans des manuels scolaires libanais et français.

CADRE THÉORIQUE

Selon le Larousse (2016, p.1166), le mot transposition désigne « une action de placer des éléments dans un ordre différent de celui où ils figuraient ». En musique ce mot désigne « le transfert des notes d'un morceau d'une hauteur à une autre sans changer ni les intervalles entre les notes ni la valeur des notes ». (Mercier (2002, p.135) rappelle ces origines du mot « transposition » et l'introduction de la notion de la transposition, par Verret en 1975, en sociologie, pour identifier les savoirs enseignables à partir des savoirs savants. Il a fallu attendre Chevallard (1985/1991) pour que la notion de transposition soit adoptée en didactique des mathématiques. Il en proposa la définition suivante : « Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre sa place parmi les objets d'enseignement. Le « travail » qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la transposition didactique » (Chevallard et Joshua, 1991, p.39). De nos jours, la notion de transposition didactique, qui comporte les étapes décrites ci-après, se retrouve dans toutes les didactiques³⁴.

La transposition didactique, qui n'est ni bonne ni mauvaise en elle-même, est un processus inévitable pour créer des objets didactiques (de savoir et d'enseignement tout à la fois) « rendus « nécessaires » par les contraintes du fonctionnement didactique » (Chevallard et Joshua, 1991, p. 41). Au cours de ce processus, une « élémentarisation » s'opère afin de donner une forme scolaire à un savoir savant (Astolfi, 2014, p.47). En d'autres termes, le système scolaire crée un savoir enseignable, qui résulte des manipulations des savoirs savants et des savoirs relatifs à des pratiques sociales de références tout au long d'un processus qui témoigne des interférences entre les savoirs savants et des facteurs sociaux comme la culture et les valeurs de la société (Astolfi, 2014). Durant ce processus, une réélémentarisation, ou une réorganisation du savoir, vise à l'adapter au niveau de développement cognitif, au bagage conceptuel, et aux préoccupations de l'élève (Chevallard, 1997). C'est ainsi que le savoir savant, créé dans la communauté scientifique, suit un long parcours avant d'être acquis par l'apprenant. Les transformations réalisées durant ce parcours dépendent de facteurs qui relèvent de

³⁴ Les didactiques, selon Reuter et al. (2013), sont « les disciplines de recherche qui analysent les contenus (savoirs, savoir-faire) en tant qu'ils sont objets d'enseignement et d'apprentissage, référés/ référables à des matières scolaires. »

l'environnement social et culturel ainsi que de facteurs personnels relatifs à l'enseignant et aux élèves.

Au cours du processus de la transposition didactique, le savoir savant risque de subir des « transformations adaptatives » en fonction de l'environnement social et scolaire. Chevallard (1985/1991) en dénombre sept : la dogmatisation, la décontextualisation, la dépersonnalisation, la désyncrétisation, la programmation, la reformulation et l'opérationnalisation. Une « surveillance épistémologique » est donc essentielle pour réduire l'écart entre le savoir savant et le savoir enseigné (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel et Toussaint, 2008, p.149). Une transposition didactique réussit si elle témoigne d'une réflexion épistémologique adoptant trois démarches : une démarche philosophique qui s'intéresse à la méthode scientifique ; une démarche scientifique qui distingue le savoir tel que reconnu par la communauté scientifique et une démarche humaniste qui s'interroge sur le contexte historique et socio-culturel de la construction du savoir (Verhaeghe, Wolfs, Simon et Compère, 2004).

Le long processus de la transposition didactique peut être divisé en deux grandes étapes : 1) la transposition didactique externe, effectuée principalement par les concepteurs de programmes et les auteurs de manuels, qui débouche sur les collections de manuels scolaires utilisées en classe et 2) la transposition didactique interne, effectuée principalement par les enseignants, qui est une adaptation de ces manuels en classe.

Une même collection de manuels scolaires reflète habituellement l'approche pédagogique et didactique préconisée par le programme de formation dont il vise l'apprentissage, de même que l'approche adoptée par ses auteurs. Les manuels scolaires analysés dans la présente recherche sont des manuels français, conçus selon une approche par compétences, et des manuels libanais, conçus selon une approche par objectifs.

Gerard et Roegiers (2003) distinguent deux aspects du manuel scolaire liés à l'apprentissage : les objets d'apprentissage et les activités de structuration des apprentissages. En premier lieu, les objets d'apprentissage sont classés en quatre catégories : les particuliers, les

classes, les relations, les structures. Le tableau résume cette analyse des composantes de l'apprentissage en proposant l'exemple de la quantité de matière en chimie.

Composante de l'apprentissage	Définition de la composante (Gerard et Roegiers, 2003, p.46-47)	Exemple de la quantité de matière.
Les particuliers	Éléments ou évènements singuliers n'ayant aucun caractère de généralité.	Unité « mol » dans le SI. Nombre d'Avogadro. Nombre de masse d'un atome.
Les classes	Ensembles d'éléments possédant au moins une propriété commune.	Le concept de mole.
Les relations	Propositions qui contiennent des variables.	La quantité de matière en chimie vaut le rapport de la masse du corps sur la masse d'une mole de l'entité (atome, ion, molécule) constituant cette matière. La quantité de matière vaut le rapport de nombre d'entités (atomes, ions, molécules...) constituant cette matière sur le nombre d'Avogadro.
Les structures	Ensembles de relations.	Calculer la masse molaire atomique à partir de la masse atomique. Calculer la masse molaire moléculaire à partir des masses molaires atomiques.

Tableau 1 : les composantes de l'apprentissage

Ces objets d'apprentissage doivent se manifester dans des activités que Gerard et Roegiers classent en trois genres : les savoir-reproduire, les savoir-faire et les savoir-être. Les savoir-reproduire consistent à dupliquer ce qui a été appris ; le savoir-faire consiste à investir un savoir dans une situation donnée probablement nouvelle ; un savoir-être est le fait de déployer spontanément des savoir-faire dans des situations tout à fait nouvelles.

Le tableau 2 montre des exemples de croisement entre la classification des savoirs et les objets d'apprentissage.

Objet d'app. Activités	Particulier	Classe	Relation	Structure
Savoir-reproduire	Quelle est la valeur du nombre d'Avogadro ?	Quelle est la définition d'une mole ?	Quelle est la relation entre la quantité de matière d'une substance et sa masse ?	Calculer la quantité de matière dans une substance sachant sa masse et sa masse molaire.
Savoir-faire	Comparer des quantités de matière dans une même masse de substance.	Distinguer entre masse et quantité de matière de différentes substances.	Calculer une quantité de matière à partir d'un nombre d'entités.	Calculer une quantité de matière sachant la masse et la représentation symbolique de l'atome.
Savoir-être	Prendre l'habitude de consulter la table des masses molaires.	Prendre l'habitude de lire des bilans de laboratoire où la mol est utilisée comme unité.	Exploiter des données de bilans de sang ou étiquette de bouteilles.	Calculer une quantité de matière à partir du volume de la substance.

Tableau 2 : les activités et les objets d'apprentissage

Ces activités s'exercent dans trois domaines d'apprentissage : le domaine cognitif, le domaine sensori-psycho-moteur et le domaine socio-affectif. Dans le cadre de la présente recherche, l'intérêt est surtout accordé au domaine cognitif qui consiste en la création de schèmes cognitifs chez l'élève.

Le manuel scolaire doit donc assumer des fonctions orientées vers un apprentissage adéquat des différents concepts disciplinaires. Gérard et Roegiers (2003) explicitent ces fonctions, qui seront reprises pour l'analyse des résultats de la recherche présente. Tout d'abord, un manuel scolaire favorise l'acquisition de connaissances (concepts, règles, formules, faits, etc.) qui permettent à l'élève, non seulement de répéter des textes, mais aussi de les exploiter en développant un savoir-faire. Ensuite, les activités proposées dans un manuel développent des

capacités³⁵, des attitudes³⁶ et des compétences. Certaines activités sont des situations dans lesquelles l'élève exploite des ressources internes (savoir, savoir-faire et savoir-être) et des ressources externes³⁷ (environnement scolaire, environnement social et culturel). À ces fins, des activités de consolidation semblent essentielles pour que l'élève exerce sa compétence dans différentes situations et assure une stabilité de son développement. Enfin, des activités d'évaluation formative favorisent les remédiations et les améliorations de l'apprentissage. L'évaluation formative est implicite dans chaque situation qui favorise le développement de la compétence, mais des activités d'évaluation explicites peuvent aussi se retrouver dans le manuel.

Le manuel scolaire se présente comme une référence où l'information est précise et exacte et qui reflète une culture sociale et pédagogique. De nombreuses recherches se sont intéressées à divers problèmes en lien avec la transposition didactique du concept de mole en chimie.

La mole est un concept qui associe les trois domaines du savoir en chimie et qui implique des nombres inaccessibles, dont le plus grand est le nombre d'Avogadro. « L'immensité [de ce nombre] met en valeur la taille infinitésimale de l'atome » (Levy, 2015, p.169). Ce monde, décrit par des symboles et des modèles, rend la chimie abstraite et énigmatique. Relier ce monde sous-microscopique au monde macroscopique en fondant un savoir pertinent explique plusieurs des défis constants de l'enseignement et de l'apprentissage de cette science. Ces défis peuvent être d'ordre sémantique, didactique et cognitif.

Tout d'abord un défi sémantique, puisque les résultats des analyses qualitatives du contenu menées par Fraenkel et Wallen (2006) ainsi que Pekdağ et Azizoğlu (2013) permettent de distinguer trois types d'erreurs relatives à l'utilisation et à l'interprétation linguistique du concept de « quantité de matière » : les concepts manquants, les incohérences et les expressions

³⁵ Les capacités-clés sont : apprendre à se connaître et à se transformer ; apprendre à vivre en groupe et en institution ; apprendre à apprendre ; apprendre à entreprendre.

³⁶ Les attitudes comme « la curiosité, la minutie, la précision, l'esprit critique et le respect de l'environnement » (Thouin, 2017a, p. 28).

³⁷ Les ressources Dion, Durand et Grenier, 2006 ; Laurier et al., 2005 ; Scallon, 2004).

inappropriées. Les concepts manquants sont des mots ou expressions pouvant préciser l'échelle macroscopique du contenu (ex. : solide, gaz) ; les incohérences sont des expressions pouvant mener à confondre la quantité de matière avec la masse ou avec le volume ou d'autres concepts ; les expressions inappropriées montrent un usage inadapté de l'échelle microscopique ou de l'échelle macroscopique dans la consigne, une préférence de l'expression « nombre de mole » à « quantité de matière » et une limitation du concept de quantité de matière à des termes spécifiques (atomes, molécules, ions) ou à des termes plus généraux (ex. : particule).

Ensuite un défi didactique puisque la transposition didactique du concept de « quantité de matière » vise des simplifications qui, en réalité, portent à confusion. Pekdağ, et Azizoğlu (2013) retiennent essentiellement les expressions qui mènent implicitement à une confusion entre mole et masse. Par exemple : « la mole représente non seulement une quantité précise de particules mais une masse définie de la substance » ou « en général, la masse molaire, M_A , en grammes par mole, a une valeur équivalente au nombre de masse ». Par conséquent, Fang, Hart et Clarke (2016) considèrent deux volets du sens de la mole : un volet de nombre et un volet de masse. Ils montrent aussi l'importance de créer un lien entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique. Selon les chercheurs, l'explication du concept de mole devrait tenir compte de deux idées-liens : la première concerne un lien entre l'atome ou la molécule et le nombre élémentaire, le nombre d'Avogadro ; la deuxième considère la masse relative de l'entité et la masse molaire. Ces deux aspects créent chacun un lien entre le concept d'atome/de molécules et le concept de mole. À partir de ces idées-liens essentiels, des relations pourraient être construites.

Enfin un défi cognitif. À ce sujet, Furió et al. (2002) confirment d'abord que les analogies facilitent l'appréhension du concept de la mole. Ils recensent les analogies construites dans différentes recherches didactiques et concluent que les analogies réussies : sont intelligibles ; créent une relation claire entre la situation familière et la situation chimique ; facilitent le transfert de la solution du contexte de la situation familiale à celui de la situation chimique ; sont utilisées pour une longue durée. Par exemple, les analogies réussies recensées écartent les analogies entre le nombre d'Avogadro et les douzaines ou les dizaines, pourtant souvent retrouvées dans les manuels scolaires. En effet, ces analogies appartiennent à l'échelle

macroscopique (les quantités sont dénombrables) et ne facilitent pas la création de liens avec l'échelle microscopique où le dénombrement est impossible.

Ensuite, toujours au sujet du défi cognitif, la modélisation a un rôle important à jouer. « Penser avec des modèles » ou « apprendre la modélisation » c'est acquérir la compétence de résoudre des problèmes en faisant concorder des « théories » et des « faits » (Ney, 2006). 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). Il évolue avec l'évolution des lois et de la théorie auxquelles il est associé. Un modèle est « hypothétique, modifiable et pertinent pour certains problèmes, dans certains contextes » (Martinand, 1996, p. 1/ 2010, p. 20).

Un modèle peut posséder deux fonctions. Soit il possède une fonction pratique et technique et permet une « réduction opératoire » puisqu'il aide à illustrer un fonctionnement ou des relations. Soit il possède une fonction théorique (Crête et Imbeau, 1996) et les lois associées à une théorie sont représentées par le modèle et reliées entre elles.

Les modèles peuvent être classés en trois catégories : les modèles à l'échelle (ex. : illustrer l'objet à une échelle plus petite ou plus grande, comme les modèles moléculaires), les modèles analogiques (ex. : construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier, exemple le modèle atomique) et les modèles théoriques (ex. : construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène, par exemple des relations entre des variables) (Crête et Imbeau, 1996). Dans ce dernier cas, la modélisation vise une « représentation calculable » (Martinand, 2010 ; Martinand et al., 1992). À noter que pour le concept de mole, on se sert surtout du modèle à l'échelle et du modèle théorique. Cela dit, Moss et Pabari (2010), relèvent la difficulté des élèves à structurer et organiser les informations et à modéliser ; ils finissent par mémoriser ou faire des applications purement algorithmiques de relations. Par exemple, Pekdağ, et Azizoglu (2013) montrent que les élèves appliquent les formules sans les comprendre, et donnent ainsi faussement l'impression d'avoir compris la nature quantitative du concept de « quantité de matière » associé à celui de mole.

En conclusion, une bonne transposition didactique dans les manuels consiste en : 1) une approche sémantique bien élaborée considérant le point de départ épistémologique du concept ; 2) une proposition d'analogies adéquates qui semble favoriser la création de liens entre les domaines du savoir de la chimie ; 3) des activités de modélisation portant sur divers types de modèles (ex. : modèle à l'échelle, modèle théorique).

L'efficacité est définie comme une adéquation entre les résultats obtenus et les objectifs définis (Avisé, 2013). Pour un apprentissage efficace du concept de mole, les objectifs semblent être : 1) définir correctement la mole ; 2) créer des liens entre le domaine microscopique et le domaine macroscopique ; 3) éviter toute confusion entre la mole, la masse et le volume.

Cette recherche visait à évaluer la transposition didactique du concept de mole dans des manuels scolaires français et libanais. Une grille, accompagnée d'échelles de Likert, a été complétée remplie pour chaque manuel. Une lecture croisée des grille a permis de répondre aux objectifs suivants :

Identifier les points forts et les points faibles de la transposition didactique du concept de mole dans chacun des manuels analysés.

Déterminer l'efficacité de l'apprentissage induit par la transposition didactique du concept de mole dans les manuels scolaires analysés.

MÉTHODOLOGIE

Cette recherche était une étude de cas comparés. L'échantillon consistait en 6 manuels scolaires dont 3 français et 3 libanais. Dans tous les cas, les éditions les plus récentes de ces manuels avaient été retenues. À noter également que, dans tous ces manuels, la présentation du concept de mole est conçue pour des élèves qui l'abordent pour la première fois.

Cette étude visait à répondre aux objectifs mentionnés ci-dessus. Elle ne visait ni à comparer les programmes d'études des pays choisis, ni à juger de la qualité de l'ensemble du manuel.

Une grille d'analyse a été complétée pour chacun de ces manuels. La grille avait été construite en s'inspirant des travaux de Thouin (2017a, p. 442) et de Gérard et Roegiers (2003).

Cette grille comportait 7 parties : 1) l'organisation de l'information, 2) le contenu scientifique et technologique, 3) l'approche didactique, 4) la lisibilité, 5) les illustrations relatives au concept de mole, 6) les facilitateurs et 7) un jugement global. L'échelle adoptée était une échelle de Likert à 5 niveaux : 0 = totalement en désaccord, 1 = en désaccord, 2 = plus ou moins d'accord, 3 = d'accord, 4 = totalement d'accord.

La première partie, « l'organisation de l'information », a permis d'évaluer la place du concept de mole dans le manuel, les types d'activités et les objets d'apprentissage ainsi que sur la possibilité de développer des capacités, des compétences et d'évaluer des acquis.

La deuxième partie, « le contenu scientifique et technologique » a permis d'évaluer : l'existence des étapes méthodologiques de l'apprentissage ; l'exactitude et la conformité des savoirs scientifiques ; le choix adéquat des analogies, des exemples et des contre-exemples ; l'évitement des erreurs sémantiques ; la création de liens entre les domaines du savoir ; l'intégration de repères culturels.

La troisième partie, « l'approche didactique » a permis d'évaluer : la prise en compte des conceptions des élèves ; la proposition d'activités de résolution de problème et l'intégration des quatre types d'activités (fonctionnelle, résolution de problème, structuration et enrichissement) ; l'intégration de repères culturels ; les liens avec la vie quotidienne.

Les quatrième et cinquième parties ont permis d'évaluer : la lisibilité (la facilité du vocabulaire utilisé ; la clarté et précision du langage ; la commodité visuelle des polices et des caractères), et les illustrations (la correspondance au contenu ; la richesse informative ; l'adéquation des illustrations ; la présence de légendes)

La sixième partie a permis d'évaluer les facilitateurs (la présence d'annexes ; la présence de références didactiques ; la présence d'un index ; la présence d'une synthèse pertinente et d'un lexique adéquat). La dernière partie a permis de porter un jugement global sur la présentation du concept de mole dans le manuel.

RÉSULTATS

Dans les manuels libanais, qui sont relativement brefs, l'approche respecte celle des programmes, qui est une approche par objectifs. Le concept de mole est présenté d'une façon encyclopédique, en lui associant des exercices ou des problèmes de type « savoir-reproduire ».

Dans les manuels français, qui sont plus exhaustifs, l'approche respecte également celle des programmes, qui est une approche par compétences. Le concept de mole est intégré au thème de la santé. Les activités proposées suivent les étapes méthodologiques de l'apprentissage (la présentation, le développement, l'application et l'intégration), mais les activités de développement consistent principalement en des applications d'algorithmes mathématiques plutôt que sur des démarches de résolution de problèmes. Par exemple, on demande à l'élève de calculer les masses qui correspondent à des quantités de cholestérol et de glucose à partir de la masse d'une mole de ces composés. L'élève qui a acquis la notion de proportionnalité, en mathématiques, pourra donner une réponse exacte mais ne saura pas forcément expliquer son calcul en se référant à ses connaissances relatives au concept de mole. La synthèse des activités comporte des définitions de mole, de quantité de matière et du nombre d'Avogadro qui sont conformes à celles du SI. Par contre, les modèles relationnels y sont transmis d'une façon dogmatique et l'élève est référé au tableau périodique pour considérer le nombre de masse « A » comme étant la masse molaire ou la masse atomique. Cette erreur sémantique risque de causer de la confusion chez l'élève, qui pourrait avoir du mal à percevoir le nombre de nucléons de masse, ou à distinguer l'échelle microscopique de l'échelle macroscopique.

Un seul manuel propose une activité de résolution de problème dans laquelle le concept de mole est plus intégré. Cela dit, la consultation d'une ancienne édition de ce manuel montre une activité mieux réussie dans laquelle les erreurs sémantiques présentes dans la nouvelle édition avaient évitées, et des repères culturels avaient été intégrés.

Dans tous les manuels, le domaine de référence et le domaine cible des analogies ne présentent pas un isomorphisme adéquat. Les analogies consistent à présenter à l'élève des paquets connus de sa vie quotidienne, comme une douzaine d'œufs. Ce genre d'analogie ne permet pas un transfert adéquat au domaine cible puisque le nombre d'Avogadro est infiniment plus grand qu'une douzaine. Les atomes ne peuvent pas être facilement dénombrés comme des œufs et l'intérêt de créer un ensemble œufs ne montre pas que le concept de mole vise à permettre un lien entre le domaine macroscopique et le domaine microscopique. Un seul manuel présente l'analogie avec les macaronis consommés par une population. Cette analogie réussit mieux à expliquer la quantité de matière représentée par le concept de mole et à créer un lien entre les domaines macroscopique et microscopique du savoir en chimie. Toutefois, les exemples présentés dans le manuel ne sont pas très variés et les contre-exemples sont absents.

Des erreurs sémantiques se sont glissées dans certains manuels. Par exemple, dans les manuels français, l'expression : « calculer la quantité de matière » est plus utilisée que dans les manuels libanais où figure dans certains cas l'expression « calculer le nombre de mole correspondant ». À noter que dans les manuels français et vu que le concept de mole est abordé dans le thème de la santé, le sens du concept a été limité aux molécules. On y trouve des calculs relatifs à des molécules (cholestérol, glucose, saccharose, etc.). L'erreur sémantique la plus commune consiste à confondre le nombre de masse « A » de l'élément ou de l'atome avec la masse molaire ou la masse atomique.

Dans l'un des manuels, on trouve un lien internet vers une animation qui est sensée expliquer le concept de mole. L'animation consiste plutôt à énumérer en chanson les unités et les sous-unités de la mole. Le bilan est simplement un rappel mathématique des unités et des sous-unités. L'erreur la plus grave est qu'à la fin, le symbole du nombre d'Avogadro (N_A) est confondu avec le symbole de l'élément sodium (Na) !

La lisibilité est adéquate dans tous les manuels et les illustrations, bien que relativement pauvres en information, sont conformes au contenu. Des facilitateurs sont présents dans tous les

manuels : les synthèses montrent tous les éléments fondamentaux de l'apprentissage du concept mole ; l'index et le lexique de chacun des manuels indiquent clairement le mot « mole ».

En résumé, l'analyse des 6 manuels scolaires libanais et français montre que le concept de mole y est abordé d'une façon relativement superficielle. Les deux aspects du concepts, tels que proposés par Fang. et al (2016), ne sont pas distingués : l'aspect nombre est mêlé à l'aspect masse. En plus des erreurs sémantiques, identiques à celles répertoriées par Pekdağ et Azizoğlu (2013), ont été trouvées dans les manuels analysés. L'élève ne pourrait pas construire de schèmes cognitifs pertinents si son apprentissage était basé uniquement sur ces manuels. Il ne pourrait pas s'approprier le langage chimique correct ni construire des liens entre les domaines du savoir en chimie. Les résultats obtenus corroborent les résultats d'analyse des manuels scolaires mexicains de Fang et al. (2016). Le contenu scientifique montre une certaine pertinence dans la présentation des particuliers et des classes, ce qui va à l'encontre de ce que Moss et Pabari (2010) avaient trouvé dans les manuels qu'ils ont analysés. Cela dit, la présentation de ce contenu ne favorise pas la construction de schèmes cognitifs cohérents qui permettraient l'appréhension des relations et des structures dans ce concept. Les activités sont surtout un « savoir-reproduire » qui demande des compétences en mathématiques. Autrement dit, l'élève peut réussir les exercices s'il s'est approprié les connaissances mathématiques qui permettent de gérer l'aspect quantitatif du concept, mais sans nécessairement comprendre l'aspect conceptuel.

Les résultats décrits ci-dessus peuvent être considérés comme un indice de l'écart entre la communauté des praticiens-enseignants et celle des chercheurs en didactique. Bon nombre d'enseignants considèrent les manuels scolaires comme des références ultimes, très fiables, alors que les chercheurs qui en font une analyse détaillée y trouvent de nombreux aspects à remettre en question. Créer des ponts entre les deux communautés serait une excellente façon de rendre l'enseignement et l'apprentissage plus efficaces.

Références

À noter : Pour éviter la confusion qui pourrait être causée par la présence de deux listes de références dans la thèse, les références de cet article ont été fusionnées avec celles de la thèse.

Annexe 4 : Guide de discussion du groupe de discussion (phase d'analyse et d'exploration)

Thème	Sous-thème	Durée estimée	Questions
Enseignement des sciences	Le curriculum	15 minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- Le curriculum libanais distingue, à partir du cycle complémentaire³⁸, les trois disciplines : biologie, physique et chimie. Parmi ces disciplines, lesquelles avez-vous enseignées ? 2- De façon générale comment pourriez-vous comparer les programmes de ces trois disciplines (contenu, horaire, etc.) ?
Enseignement de la chimie	Enseignement de la chimie (questions générales)	20 minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- Quelle est votre impression générale concernant le curriculum de chimie au cycle complémentaire ? 2- Quelles sont vos critiques principales au sujet de curriculum de chimie ? 3- Quelle est votre impression générale concernant les manuels scolaires de chimie ? 4- Quelles sont vos critiques principales au sujet des manuels scolaires de chimie ? 5- Quel est votre degré de satisfaction envers l'efficacité des manuels scolaires de chimie comme support d'enseignement et d'apprentissage ?
	Difficultés d'enseignement	20 minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- Quelles sont les principales difficultés que vous rencontrez dans l'enseignement de la chimie au cycle complémentaire ? 2- Comment procédez-vous pour atténuer ces difficultés ?

³⁸ Le cycle complémentaire est l'équivalent du collège en France et du secondaire au Québec.

	Difficultés d'apprentissage (Avant l'enseignement du concept de mole)	20 minutes	<p>1- Quelles sont les difficultés que rencontrent les élèves dans l'apprentissage de la chimie ?</p> <p>2- Comment procédez-vous pour atténuer ces difficultés?</p>
L'enseignement et l'apprentissage du concept de mole	La mole – un concept nœud	15 minutes	<p>1- Si nous considérons le concept de mole en particulier, comment situez-vous ce concept par rapport à l'ensemble des concepts de chimie enseignés en EB-9 et au secondaire ?</p> <p>2- Comment l'acquisition de ce concept peut-elle influencer l'apprentissage ultérieur en chimie ?</p>
	Le contenu exigé en classe de EB-9		<i>Afficher les objectifs concernant le concept de mole</i>
	L'enseignement du concept de mole	30 minutes	<p>1- Que pensez-vous de l'atteinte de ces objectifs ? À quel point les trouvez-vous réalistes ?</p> <p>2- Quelles sont les principales difficultés d'enseignement du concept de mole en EB-9 ?</p> <p>3- En ce qui concerne le concept de mole, quelles sont les principales difficultés d'apprentissage des élèves de EB-9?</p> <p>4- Quelles sont les erreurs les plus fréquentes que vous repérez dans les examens et les exercices résolus par les élèves concernant le concept de mole ?</p> <p>5- Avez-vous trouvé des façons, des méthodes, des recettes pour réussir à faire comprendre ce concept ?</p> <p>6- Quel genre de manipulations prévoyez-vous pour enseigner le concept de mole en EB-9 ?</p> <p>7- Décrivez une progression pertinente de ce contenu.</p> <p>8- Comment faites-vous pour transposer les différentes définitions ?</p> <p>9- Dans les manuels et dans certaines fiches de préparations, figurent des analogies avec la douzaine ou la dizaine. À quel point ces analogies pourraient-elles faciliter la transposition correcte de ce concept ?</p>

	L'apprentissage du concept de mole	20 minutes	1- Trouvez-vous que les connaissances construites par les élèves au sujet du concept de mole sont approfondies ? 2- Comment les élèves gèrent-ils le langage de ce concept ? Quelles sont les confusions que vous avez le plus souvent répertoriées ?
--	------------------------------------	------------	--

Annexe 5 : Grille d'analyse des fiches de préparation

Cette grille a été construite en se référant à : Thouin, 2017 ; Khzami et al. (2010) ; Braun (2010)

Explication de la grille :

Échelle :

0= Tout à fait en désaccord ; 1 = Plutôt en désaccord ; 2= Plus ou moins d'accord ; 3 = plutôt en accord ; 4= Tout à fait en accord

	0	1	2	3	4
La présentation matérielle : Une version numérique pourrait indiquer une certaine ouverture de l'enseignant et une intention de réviser ses préparations. Au Liban, on reproche parfois aux enseignants de toujours se servir des mêmes anciennes fiches de préparation.					
Le texte est présenté en version numérique.	Tout le texte est écrit à main levée.	Seule la synthèse est tapée.	Un copier-coller est effectué dans certaines parties.	Certaines notes sont écrites à main levée.	Tout le texte est tapé.
L'organisation de l'information : Cette partie devrait permettre d'évaluer la structuration du concept chez l'enseignant. Une organisation en paragraphe et une distinction des notions pourrait indiquer une organisation dans la gestion du contenu pendant l'enseignement.					
Le contenu est lisible (police, mise en page, etc.).	L'écriture est illisible.	Certaines parties (75% du contenu) ne sont pas lisibles.	Certaines parties (50% du contenu) ne sont pas lisibles.	Certaines parties (25% du contenu) ne sont pas lisibles.	La lecture est très facile
Les différentes parties (titres, paragraphes, sous-	Le texte est continu.	Un seul paragraphe est distingué (celui	Certains paragraphes pourraient être	Les paragraphes et les sous-paragraphes	On distingue les paragraphes et les sous-paragraphes

paragraphes, etc.) sont bien distingués		de la synthèse / des définitions).	divisés en deux ou plusieurs.	existent mais aucune indication ne les distingue du reste du texte.	par leur titre (souligné, en couleur, etc.).
Les notions, les lois et les énoncés sont bien distingués.	Aucune distinction n'est faite.	Seuls des espaces permettent de distinguer les différentes notions.	Les notions sont distinguées par de simples paragraphes.	Les notions sont distinguées en soulignant ou en écrivant en couleur les termes.	Les notions sont distinguées dans la mise à page (caractères, couleurs et sous-paragraphes).
L'organisation de l'information permet des liens clairs entre le contenu de la fiche et le manuel scolaire.	L'élève peut suivre dans son manuel scolaire.	L'élève pourra consigner certaines remarques qui n'existent pas dans le manuel scolaire.	Des références de manuels scolaires sont indiquées dans certaines parties.	L'élève se réfère au manuel scolaire pour retrouver les définitions.	L'élève doit consulter le manuel scolaire pour compléter son apprentissage.
Les objectifs d'enseignement sont indiqués	Aucun objectif n'est indiqué	Les titres des paragraphes sont les objectifs.	50% des objectifs sont indiqués.	75% des objectifs sont indiqués.	Tous les objectifs sont indiqués.
Les notions traitées sont celles proposées dans le curriculum.	Aucune des notions n'est proposée dans le curriculum.	25% des notions traitées sont proposées dans le curriculum.	50% des notions traitées sont proposées dans le curriculum.	75% des notions traitées sont proposées dans le curriculum.	Toutes les notions traitées sont proposées dans le curriculum.
<p>Le contenu scientifique : Cette section devrait permettre d'évaluer si l'enseignant maîtrise le contenu disciplinaire, s'il suit le manuel scolaire à la page (considérer les mêmes exemples, les mêmes analogies ...) et s'il enseigne d'une façon dogmatique. Les termes « l'exposé / les activités » sont employés dans certains critères puisque l'approche didactique est évaluée dans la section suivante.</p>					

Toutes les notions sont clairement définies (selon SI).	Aucune définition n'est consignée.	Les définitions sont vulgarisées.	Les définitions sont incomplètes.	Les définitions ne sont pas celles du SI mais restent pertinentes.	Les définitions sont pertinentes (selon SI).
Les différentes notions sont agencées selon un lien logique pour construire le concept.	Les notions sont présentées au hasard.	Les notions pourraient être mieux structurées.	Les notions sont agencées d'une façon structurée mais sans créer de liens entre elles.	Les notions sont agencées d'une façon structurée ; l'élève pourra créer des liens entre elles dans les applications.	Les notions sont agencées d'une façon structurée et cohérente.
Les exemples sont variés.	Il n'y a pas d'exemple.	Il y a peu d'exemples (1 ou 2).	La plupart des notions sont illustrées par un exemple.	Chaque notion est illustrée par un exemple.	Chaque notion est illustrée par plusieurs exemples
Les analogies facilitent l'appréhension du monde sous-microscopique.	Ce sont des analogies qui existent dans les manuels et elles sont du domaine macroscopique.	Ce sont des analogies des manuels et elles sont des deux domaines.	Ce sont des analogies qui existent dans les manuels et dont les limites sont précisées.	Ce sont de bonnes analogies mais le transfert entre le domaine de référence et le domaine cible n'est pas planifié.	Ce sont des analogies réussies et bien planifiée.
L'exposé / Les activités tient (tiennent) compte du domaine sous microscopique.	Le contenu traite le domaine macroscopique	Le contenu traite surtout du domaine macroscopique.	Le contenu traite du domaine macroscopique. Une indication du domaine sous-	Le contenu tient compte du domaine sous-microscopique.	Le contenu tient compte clairement du domaine sous-microscopique et le distingue du

			microscopique est faite.		domaine macroscopique.
L'exposé / Les activités relie (ent) le domaine microscopique et le domaine macroscopique.	Aucun lien n'est créé.	Il y a quelques liens très sommaires.	Il y a quelques liens sommaires.	L'élève sera capable de créer les liens à travers les activités et le langage adopté.	La création de lien est planifiée dans une activité distincte.
L'exposé / Les activités favorise(ent) une appropriation du langage.	Les erreurs sémantiques sont très fréquentes.	Plusieurs erreurs sémantiques se sont glissées dans le texte.	Quelques erreurs sémantiques se sont glissées dans le texte.	De rares erreurs sémantiques se sont glissées dans le texte.	Aucune erreur sémantique n'est présente dans le texte.
L'exposé / Les activités proposées favorisent l'appropriation de connaissances déclaratives.	Les connaissances déclaratives n'existent pas dans le texte.	Les connaissances déclaratives sont dans le manuel scolaire.	Les connaissances déclaratives sont écrites.	Les connaissances déclaratives sont transmises.	Les connaissances déclaratives sont explicitées.
L'exposé / Les activités proposées favorisent l'appropriation de connaissances procédurales.	Les connaissances procédurales n'existent pas dans le texte	Des formules sont consignées.	Des formules sont consignées et des algorithmes sont transmis.	Des formules sont consignées et des applications directes sont prévues.	Les formules sont construites par l'élève.
Les activités proposées favorisent l'appropriation de connaissances méta procédurales.	Les applications n'existent pas dans le texte.	Des applications de niveau compréhension existent dans le texte.	Des applications de niveau application existent dans le texte.	Des applications de niveau analyse existent dans le texte	Des tâches complexes sont planifiées

L'approche didactique : cette partie permet de déduire si l'enseignante adopte des perspectives constructivistes ou traditionnelle					
Les activités proposées favorisent la construction du savoir.	L'enseignement est plutôt transmissif.	L'enseignement est interactif.	Les élèves doivent résoudre des exercices en vue de construire une notion.	Des travaux d'équipe sont planifiés pour des tâches sont simples et guidées.	Des activités de modélisations sont planifiées.
Certaines activités proposées sont fonctionnelles (manipulations).	Aucune manipulation n'est prévue.	L'élève regarde une démonstration.	L'élève complète une démonstration.	L'élève exécute une manipulation.	L'élève construit et réalise son protocole expérimental.
Les activités proposées favorisent le conflit cognitif (intra-personnel ; interpersonnel).	L'élève est passif dans son apprentissage.	L'élève interagit très peu.	L'élève interagit et pourrait vivre un conflit interpersonnel.	L'élève vit un conflit interpersonnel.	L'élève vit un conflit intra-personnel et interpersonnel.
Les activités proposées favorisent l'anticipation des obstacles didactiques (langage, définitions, calculs).	Les obstacles didactiques ne sont pas anticipés.	Les obstacles didactiques relatifs aux définitions sont anticipés.	Les obstacles didactiques relatifs aux définitions et à certaines expressions sont anticipés	Les obstacles didactiques relatifs aux définitions et au langage sont anticipés.	La plupart des obstacles didactiques sont anticipés.
Les activités/L'exposé proposé(es) ont un sens pour les élèves.	Le contenu est disciplinaire.	Le contenu est disciplinaire mais les analogies rappellent la vie quotidienne.	Le contenu est disciplinaire mais les analogies et quelques exemples sont en lien avec la vie quotidienne.	Le contenu pourrait avoir du sens pour l'élève mais il est relativement théorique.	Le contenu est ancré dans la vie de l'élève et il est planifié pour créer la dévolution.

Grille complétée :

- Les nombres dans les cases indiquent le nombre de fiches de préparation.
- La case dans laquelle chaque nombre est placé indique la cote attribuée à ces fiches. (Exemple : À la ligne 1, il y a 6 fiches pour lesquels l'étudiante-chercheuse était « parfaitement en accord » avec l'énoncé « Le texte est présenté en version numérique »).

	0	1	2	3	4
La présentation matérielle					
Le texte est présenté en version numérique.					6
L'organisation de l'information					
Le contenu est lisible (police, mise en page, etc.).					6
Les différentes parties (titres, paragraphes, sous-paragraphes) sont facilement distinguées.				1	5
Les notions, les lois et les énoncés sont bien distingués.	2	1			3
Les différentes parties (paragraphes, sous paragraphes) correspondent à des notions bien identifiées.		2		1	3
L'organisation de l'information permet les liens clairs entre le contenu de la fiche et le manuel scolaire.	4				2
Les objectifs d'enseignement sont indiqués.	2			1	3
Les notions traitées sont celles proposées dans le curriculum.				4	2
Le langage (français) utilisé est adapté au niveau des élèves.					6
Le contenu scientifique					
Toutes les notions sont clairement définies (selon SI).	1	3		1	1
Les différentes notions sont agencées selon un lien logique pour construire le concept.				4	2
Les exemples sont variés.	2	2		2	
Les analogies facilitent l'appréhension du monde sous-microscopique.	4			2	
L'exposé / Les activités tient (tiennent) compte du domaine sous microscopique.	4			2	
L'exposé / Les activités relie (ent) le domaine microscopique et le domaine macroscopique.	5		1		
L'exposé / Les activités favorise(ent) une appropriation du langage.	5		1		
L'exposé / Les activités proposées favorisent l'appropriation de connaissances déclaratives.		2	3	1	
L'exposé / Les activités proposées favorisent l'appropriation de connaissances procédurales.		4	1	1	

Les activités proposées favorisent l'appropriation de connaissances méta procédurales.	5		1		
L'approche didactique					
Les activités proposées favorisent la construction du savoir.	4		1	1	
Certaines activités proposées sont fonctionnelles (manipulations).	6				
Les activités proposées favorisent le conflit cognitif (intra-personnel ; interpersonnel).	4	2			
Les activités proposées favorisent l'anticipation des obstacles didactiques (langage, définitions, calculs).	5			1	
Les activités/L'exposé proposé(es) ont un sens pour les élèves.	5			1	

Annexe 6 : L'évaluation diagnostique

Nom :

Consignes :

- *Écrire les réponses sur la même feuille.*
- *Gérer le temps : 30 minutes.*
- *L'utilisation d'une calculatrice est autorisée.*
- *Utiliser les pages de brouillon jointes.*

Données :

- La constante d'Avogadro est $6,023 \times 10^{23}$
- Masse molaire du cuivre : $M(\text{Cu}) = 63 \text{ g.mol}^{-1}$
- Les nucléides des atomes de fer, de cuivre et de potassium : ${}^{56}_{26}\text{Fe}$; ${}^{39}_{19}\text{K}$; ${}^{63}_{29}\text{Cu}$

I. Une statue en cuivre pèse 6,3g. Calculer le nombre de mole d'atomes de cuivre correspondant.

.....
.....
.....

II. Une lame de fer contient 3 mol d'atomes. Quel est le nombre d'atomes de fer dans la lame ? (Écrire votre démarche)

.....
.....
.....

III. Une goutte d'eau contient 3×10^{-3} mol d'eau. Quel est le nombre de molécules dans une goutte d'eau ?

.....
.....
.....

IV. Trouver la quantité de matière de potassium qui a une masse de 1 g.
Trouver le volume de 2 mol d'atomes de potassium sachant que la masse de 1 ml est 0,89g

.....
.....
.....
.....

.....
.....

V. Lire le texte suivant, puis répondre aux questions.

Le sodium est un métal alcalin. Il réagit vivement avec l'eau : si on pose 1 g de sodium dans un tube à essai contenant un excès d'eau, soit 10 mL, on notera le dégagement de $0,12 \times 10^{23}$ molécules de dihydrogène et la formation de $42,5 \times 10^{-3}$ mol d'hydroxyde de sodium. Le sodium est aussi un minéral retrouvé dans le corps humain dont le taux normal est 0,14 fois le nombre d'Avogadro d'ions sodium dans un litre de sang.

1- Trouver dans le texte toutes les données qui sont des quantités de matières.

.....
.....
.....

2- Donner le symbole du Nombre d'Avogadro. À quoi correspond-il ?

.....
.....
.....

Analyse des réponses attendues et anticipées.

Question	Corrigé	Réponses erronées attendues	Obstacle d'apprentissage	Remarques
<p>Une statue en cuivre pèse 6,3g. Calculer le nombre de mole d'atomes de cuivre correspondant.</p>	<p>L'élève doit dresser un tableau de proportionnalité ou écrire un texte où les variables sont clairement reliées.</p> $n_{mol} = \frac{masse}{masse\ molaire}$ $n_{mol} = \frac{6,3}{63}$ $n_{mol} = 0,1\ mol$	$n = \frac{m}{M}$	<p>Les élèves appliquent la formule d'une façon automatique sans comprendre le sens des symboles.</p>	<p>La masse molaire du cuivre est donnée par hypothèse</p>
		<p>Réponse : n= 0,1 ou n= 0,1 mole</p>	<p>Les élèves confondent l'unité avec le concept.</p>	
<p>Une lame de fer contient 3 mol d'atomes. Quel est le nombre d'atomes de fer dans la lame?</p>	<p>L'élève doit dresser un tableau de proportionnalité ou écrire un texte où les variables sont clairement reliées.</p> $n_{mol} = \frac{nombre\ d'atomes}{Nombre\ d'Avogadro}$ $n_{mol} = \frac{n_{atomes}}{N_A}$ $n_{atomes} = n_{mol} \times N_A$ $n_{atomes} = 3 \times 6,023 \times 10^{23}$ $n_{atomes} = 18,069 \times 10^{23}\ atoms$	$n = \frac{N}{N_A}$	<p>Les élèves appliquent la formule d'une façon automatique sans comprendre le sens des symboles. A noter que N est aussi utilisée pour désigner le nombre de neutrons.</p>	<p>Les élèves pourront remplacer N_A par sa valeur (donnée par hypothèse) dès la première opération.</p>
		<p>Réponse sans unité</p>	<p>Les élèves croient que l'atome ne peut pas être une unité</p>	
		<p>Sans l'exposant de 10</p>	<p>Les élèves n'appréhendent pas ce nombre qu'ils n'arrivent pas à hiérarchiser.</p>	

			Les élèves ont de la difficultés à calculer les nombres avec des exposants de 10 (Par exemple, ils considèrent le nombre sans l'exposant)
<p>Une goutte d'eau contient 3×10^{-3} mol d'eau. Quel est le nombre de molécules dans une goutte d'eau?</p>	$n_{mol} = \frac{\text{nombre de molécules}}{\text{Nombre d'Avogadro}}$ $n_{mol} = \frac{n_{molécules}}{N_A}$ $n_{molécules} = n_{mol} \times N_A$ $n_{molécules} = 2 \times 10^{-3} \times 6,023 \times 10^{23}$ $n_{molécules} = 12,046 \times 10^{20} \text{ molécules}$	$n = \frac{N}{N_A}$	Les élèves appliquent la formule d'une façon automatique.
		<p>Réponse sans unité ou probablement avec mol comme unité</p>	<p>Sans unité : Les élèves croient que la molécule ne peut pas être une unité. Unité= mol :</p> <p>Les élèves confondent molécule et mol.</p>
		Exposant de 10 incorrect	Voir question précédente

<p>Trouver la quantité de matière de potassium qui a une masse de 1 g.</p>	<p>La masse de l'atome est concentrée dans son noyau :</p> $m_{\text{atome}} = m_{\text{des nucléons}}$ $m_{\text{atome}} = A \times m_{\text{d'un nucléon}}$ $m_{\text{atome}} = 39 \times 1 \text{ u.m.a}$ $m_{\text{molaire atomique}} = N_A \times m_{\text{atome}}$ $m_{\text{molaire atomique}} = 39 \text{ g}$ $n_{\text{mol}} = \frac{\text{masse}}{\text{masse molaire}}$ $n_{\text{mol}} = \frac{1}{39}$ $n_{\text{mol}} = 0,0256 \text{ mol}$	<p>Considérer le nombre de nucléons A comme étant la masse molaire (ne pas calculer la masse de l'atome et la masse molaire)</p>	<p>- les élèves n'arrivent pas à créer le lien entre le domaine microscopique et le domaine macroscopique et les symbolique (relation du triplet) - Les élèves ne distinguent pas entre masse atomique, masse molaire et nombre de nucléons</p>	<p>Épistémologie : dans l'hypothèse, le nuclide du potassium est donné et non la masse molaire comme au premier exercice..</p>
		<p>Répondre 1 mol car ils confondent la quantité de matière avec la masse</p>	<p>En physique, la masse est par définition la quantité de matière. A noter que cette définition est apprise en EB-7 (5 ème)</p>	
<p>Trouver le volume de 2 mol de potassium sachant que la masse de 1 ml est 0,89g</p>	<p>Masse= $n_{\text{mol}} \times M_{\text{molaire}}$ $m = 2 \times 39$ $m = 78 \text{ g}$</p>	<p>$V = \frac{2}{0,89}$ $V = 2,247 \text{ mL}$</p>	<p>(voir question précédente)</p>	

	le volume : $\frac{m}{V} = \frac{0,89}{78}$ $V = \frac{0,89}{0,89}$ $V = 87,6 \text{ mL}$	ou pas de réponses	Les élèves confondent mol et mL	
<p>3- Trouver dans le texte toutes les données qui sont des quantités de matière.</p> <p>4- Donner le symbole du Nombre d'Avogadro. A quoi correspond-il ?</p>	$42,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ 0,14 fois le nombre d'Avogadro d'ions sodium	Choisir d'autres valeurs numériques et leur unités	confondre mol avec molécule, mL Les élèves confondent mol et masse	Les élèves peuvent indiquer 1g qui est définie en physique comme quantité de matière.
	N_A Le nombre d'Avogadro, désigne la quantité d'entité retrouvée dans une mole	NA ou Na	Les élèves confondent le symbole du nombre d'Avogadro avec le symbole du sodium	Généralement, les élèves considèrent que le symbole du sodium est S.

Grille d'évaluation des réponses des élèves (La grille est complétée par l'enseignante sur un fichier Excel)

Question 1. Une statue en cuivre pèse 6,3g. Calculer le nombre de mole de cuivre correspondant.					
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève répond en explicitant le raisonnement	L'élève applique automatiquement la formule $n=m/M$	L'élève pose correctement l'unité	L'élève calcule correctement

Question 2. Une lame de fer contient 3 mol d'atomes. Quel est le nombre d'atomes de fer dans la lame?					
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève répond en explicitant le raisonnement	L'élève applique automatiquement la formule $n= N/NA$	L'élève pose correctement l'unité	L'élève calcule correctement

Question 3. Une goutte d'eau contient 3×10^{-3} mol d'eau. Quel est le nombre de molécules dans une goutte d'eau?					
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève répond en explicitant le raisonnement	L'élève applique automatiquement la formule $n= N/NA$	L'élève pose une unité correcte	L'élève calcule correctement

Question 4.	Calculer la quantité de matière correspondant à 1 g de potassium.				Calculer le volume de 2 mol de potassium sachant que 1 ml pèse 0,89g		
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève répond en explicitant le raisonnement	L'élève calcule correctement	L'élève pose une unité correcte	L'élève fait l'exercice	L'élève répond en explicitant le raisonnement	L'élève distingue la mole et le volume (mol et mL)

	Question 5. Relever les quantités de matières.			Donner le symbole du Nombre d'Avogadro.		A quoi correspond-il ?	
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève choisit uniquement les quantités de matière	Remarque (l'élève confond la mole avec la molécule ? le	L'élève fait l'exercice	L'élève donne le symbole correct	Remarque : l'élève confond le symbole du nombre	L'élève définit le nombre d'Avogadro

Annexe 7 : Guide de discussion des retours réflexifs des enseignantes

Thème	Durée	Questions
Mise à l'essai	5 minutes	Comment peux-tu décrire ta mise à l'essai d'une façon générale?
L'enseignement et l'apprentissage	20 minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- Comment peux-tu décrire les séances que tu as animées ? 2- Quels ont été les événements marquants durant ces séances ? Qu'est-ce que tu as fait durant ces moments ? 3- Décris le comportement des élèves durant les activités (en commençant par la première). 4- Décris l'interaction : <ol style="list-style-type: none"> a- Entre les élèves ; b- Entre toi et les élèves. 5- Quel genre de questions posaient les élèves ? 6- Partage des résultats de l'évaluation.
Amélioration	15 minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- As-tu repéré des points faibles dans la séquence ? Lesquels ? 2- Qu'est-ce qui était très réussi dans la séquence ? 3- Quelles sont les améliorations que tu proposerais à tes collègues ?

Annexe 8 : Les évaluations formatives

Évaluation formative durant le mésocycle 3 : Le grain de sable

Travail individuel

Durée : 10 minutes

Vous observez un grain de sable à l'aide d'un microscope très puissant. Décrire, à l'aide d'un texte ou d'un dessin, ce que vous pourriez observer.

Grille d'évaluation des productions des élèves (La grille est complétée sur un fichier Excel) :

Élève	L'élève choisit de s'exprimer par			L'élève distingue une échelle microscopique et une échelle macroscopique	L'élève utilise comme annotations / termes utilisés		
	un schéma	un texte	un schéma et un texte	L'élève distingue une échelle microscopique et une échelle macroscopique	L'élève utilise les termes <i>atomes/ molécules/ entités/ grain de sable</i> dans son texte ou pour annoter le schéma	L'élève utilise le terme <i>mole</i> dans son texte ou pour annoter son schéma	L'élève utilise le nombre d'Avogadro dans son texte ou pour annoter son schéma

Évaluation formative durant le mésocycle 4 : énoncé d'un exercice

Consignes :

- Se répartir en équipes de 5 personnes
- Écrire sur la feuille distribuée par l'enseignante.
- Ne pas appeler l'enseignante
- Document permis : le tableau périodique
- Temps prévu : 40 minutes

Question :

- Proposer un exercice ou un problème sur le concept de la quantité de matière (la mole).
- Proposez également la solution de votre exercice ou problème.

Grille d'évaluation des énoncés (la grille est complétée sur un fichier Excel)

L'énoncé de l'exercice / problème	Les élèves proposent, dans l'énoncé, une situation ancrée dans leur vie quotidienne
	Les élèves proposent une masse molaire correcte
	Les élèves créent des liens (quantitatifs) entre différentes variables physiques
	Les liens créés entre les différentes variables sont pertinents
	Les élèves préfèrent utiliser l'expression « nombre de mole de »
	Les élèves préfèrent utiliser l'expression «nombre de mole de»
Le corrigé proposé	les élèves créent un lien entre le domaine microscopique et le domaine macroscopique
	Le corrigé de l'exercice est correcte
	Les unités sont posées
Le vocabulaire utilisé	les unités sont correctes
	Les erreurs sémantiques d'incohérence sont évitées
	Les erreurs sémantiques de concept manquant sont évitées
Habilités cognitives	Les erreurs sémantiques d'expressions inappropriées sont évitées
	Application
	Analyse
autres erreurs	
Remarques	

Annexe 9 : Le matériel didactique créé

Cet annexe présente le matériel didactique construit et amélioré au cours des mésocycles 3, 4 et 5. Pour chaque mésocycle, sont présentés :

L'activité de perfectionnement animée par l'étudiante-chercheure.

Le matériel didactique construit par les enseignantes participantes et l'étudiante-chercheure. Ce matériel consiste en une séquence d'apprentissage et des exercices. Le matériel didactique est construit en se basant sur l'analyse des difficultés d'enseignement et d'apprentissage du concept de mole, les approches d'enseignement (la modélisation et l'analogie) et les propositions pour un enseignement efficace du concept. Le tableau 3 (analyse didactique du contenu) et le tableau 8 (les ressemblances entre le domaine de référence et le domaine cible de l'analogie utilisée) constituent un résumé de l'analyse préalable à la construction de ce matériel.

À noter que les élèves ont reçu ces fiches. Les paragraphes objectifs d'enseignement et consignes de travail sont des paragraphes d'informations pour les élèves : annoncer l'objet d'apprentissage et informer sur le type de travail (en équipe ou individuel) et le temps. Les élèves sont habitués à recevoir ce genre de fiches en mathématiques et en sciences. Les réponses attendues aux activités d'apprentissage sont consignées en italique.

A- Mésocycle 2

Activité de perfectionnement animée par l'étudiante-chercheure au cours du mésocycle 2

Objectifs de l'activité de perfectionnement :

- 1- Identifier les difficultés d'enseignement et d'apprentissage en sciences et plus particulièrement en chimie.
- 2- Identifier les conceptions et les obstacles d'apprentissage relatifs à la mole.
- 3- Déterminer les caractéristiques d'une bonne analogie.
- 4- Expliciter l'enseignement de la modélisation.

Déroulement :

- 1- L'étudiante-chercheure a fait un retour sur les résultats obtenus au mésocycle 1.
- 2- Pour atteindre les objectifs 1, 3 et 4 cités ci-dessus, les enseignantes se sont réparties en binômes. L'étudiante-chercheure a fourni à chaque binôme un article parmi les trois articles suivants :
 - i. Dupin, J.-J., et Joshua, S. (1994). Analogie et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, (3), 9-26.
 - ii. Legendre, M.-F. (1994). Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire : un état de la question. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(4), 657.
 - iii. Martinand, J. L. (1996). Introduction à la modélisation. *Actes du séminaire de didactique des disciplines technologiques*, 1994-95.

Chaque équipe a disposé de 45 minutes pour lire et faire une synthèse de chaque article. L'étudiante-chercheure s'est assurée de la bonne compréhension des différents concepts développés dans les articles. Chaque équipe a présenté aux autres ses résultats. (le contenu est conforme à ce qui a été présenté au paragraphe 2.3.1)

- 3- L'étudiante-chercheure a défini les conceptions et les obstacles d'apprentissage. L'étudiante-chercheure a animé une discussion avec les enseignantes au sujet des conceptions et des obstacles d'apprentissage relatifs au concept de mole. L'étudiante-chercheure a présenté le tableau 1.
- 4- L'étudiante-chercheure a discuté avec les enseignantes participantes de l'importance du concept de mole dans le programme de chimie.
- 5- Les enseignantes ont construit la séquence d'enseignement du concept. Elles ont réalisé au laboratoire les différentes activités. Pour valider l'analogie proposée l'étudiante-chercheure a construit avec les enseignantes le tableau 8 (les ressemblances entre le domaine de référence et le domaine cible de l'analogie utilisée).

La présentation suivante était un support à l'activité de perfectionnement.

Le concept de « mole »

1

Objectifs :

- Identifier les difficultés d'enseignement et d'apprentissage en sciences et plus particulièrement en chimie.
- Identifier les conceptions et les obstacles d'apprentissage relatifs à la mole.
- Déterminer les caractéristiques d'une bonne analogie.
- Expliciter l'enseignement de la modélisation.

2

Retour sur le groupe de discussion

• Retour sur les résultats du groupe de discussion:

- Remarques sur le curriculum de chimie.
- Les difficultés d'enseignement (temps, hétérogénéité de la classe, abstraction des concepts en chimie, le domaine microscopique et le domaine macroscopique, manque de disponibilité de ressources pour les scénarios expérimentaux ...)
- Les difficultés d'apprentissage (symboles, calcul, ...)
- Pas de propositions de modifications des préparations ; une simplification des savoirs.

• Résultats du test diagnostique:

- Application mécanique des formules
- Confusions langagières
- Problèmes avec les définitions.

3

Atelier de travail (1)

- Se répartir en binômes
- Gérer le temps de l'activité (45 minutes)
- Lire le document proposé et répondre aux questions correspondantes.

4

Questions

- Document 1 : Modélisation :
 1. Définir la modélisation.
 2. Quels sont les avantages de l'enseignement de la modélisation.
 3. Comment enseigner la modélisation ?
- Document 2 : Analogie
 1. Définir l'enseignement par analogie.
 2. Quels sont les critères d'une analogie réussie
- Document 3 : Problématique de l'enseignement des sciences
 1. Faire un résumé des difficultés d'enseignement et d'apprentissage des sciences.

5

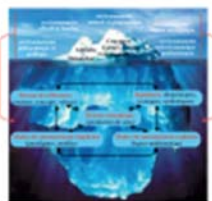
Les difficultés d'apprentissage en chimie

1. Le triangle du savoir en chimie (Johnston, 1993) – la relation du triplet (Gilbert et Treagust, 2009).
2. Intéraction du langage avec le concept (Barlet et Plouin, 1994)
3. Les conceptions résultantes
4. Les difficultés mathématiques
 - Langage transdisciplinaire
 - Erreurs systématiques

6

Les conceptions

- « Une conception est un système explicatif personnel et fonctionnel, qui n'est pas nécessairement exprimé au cours des activités scolaires » (Astolfi, et al., 2008, p.147).



Astolfi et Peterfalvi (2008)

Revue des Sciences de l'Éducation

7

7

- Les conceptions sont efficaces dans la plupart des contextes, **persistantes et résistantes** à l'enseignement direct.

- D'après les recherches consultées, il est confirmé qu'apprendre, c'est transformer les conceptions en de nouvelles conceptions plus plausibles et plus crédibles à travers des activités ayant du sens et générant un **conflit cognitif**. Parfois, une ouverture aux autres disciplines est essentielle pour éviter les obstacles d'apprentissage.

Astolfi et Peterfalvi (2008)

Revue des Sciences de l'Éducation

8

8

Les obstacles

- Les conceptions relatives à différentes notions non reliées pourraient émerger sous forme d'un obstacle qui a « un caractère plus général et plus transversal » (Astolfi et Peterfalvi, 1993, p.106)
- Brousseau (2010), distingue les obstacles épistémologiques dont l'origine est dans l'histoire et dans la culture, des obstacles didactiques générés par l'enseignement, des obstacles ontogénétiques dus au développement

Astolfi et Peterfalvi (1993)

Revue des Sciences de l'Éducation

9

9

Importance du concept de la mole dans les programmes



Astolfi et Peterfalvi (2008)

Revue des Sciences de l'Éducation

10

10

- Le concept de mole est un concept noué en chimie qui stipule des obstacles

- Épistémologiques: les savoirs relatifs à ce concept appartiennent aux trois domaines du savoir en chimie
- Didactiques: l'enseignement de ce concept ne tient pas compte de plusieurs difficultés

Astolfi et Peterfalvi (2008)

Revue des Sciences de l'Éducation

11

11

Quelques résultats

1. Confusion langagière : phonétique (mole; molécule); symbole (Na et Na); unité (mol); manque de précision des symboles (N est utilisé pour nombre d'atomes, nombre de molécules et nombre de neutrons); nombre de masse avec masse ...
2. Application mécanique des formules
3. Analogies non pertinentes.
4. Absence de l'enseignement de la modélisation de la mole.

Astolfi et Peterfalvi (2008)

Revue des Sciences de l'Éducation

12

12

Séquence d'apprentissage construite au cours du mésocycle 2

La mole

Objectifs d'enseignement :

- Définir la mole.
- Établir une relation entre la quantité de matière et la masse.

Consignes de travail :

- Se répartir en sous-groupes de 3 personnes.
- Répondre sur le cahier.
- Bien gérer le temps de chaque activité.
- Ne pas appeler l'enseignante.

Activité 1 :

Travail en sous-groupes : (10 minutes)

Décrire un protocole expérimental permettant de séparer, sans dénombrer, chaque $3,75 \times 10^5$ grains identiques de sucre. (Note : Les grains de sucre sont tous relativement identiques)

Il est attendu que les élèves demandent la masse d'un groupement de grains. L'enseignante donnera l'information suivante : $1,5 \times 10^5$ grains de sucre ont une masse de 27g.

Deux protocoles peuvent être proposés par les élèves :

Protocole 1 :

Si $1,5 \times 10^5$ grains de sucre ont une masse de 27g donc $3,75 \times 10^5$ grains ont une masse de 67,5g. Il suffit de déterminer cette masse.

Protocole 2 :

*Chaque sac contient $1,5 \times 10^5$ grains. Donc $3,75 \times 10^5$ grains sont contenus dans 2,5 sacs
Il faut construire deux sacs dont la masse de chacun est 27g et un sac rempli à moitié donc sa masse est $27/2 = 13,5$ g*

Si les élèves ne proposent pas cette méthode, l'enseignante pourrait les guider durant le travail en sous-groupes pour la proposer.

Les résultats sont gardés devant les élèves.

Mise en commun (10 minutes)

Réaliser le protocole expérimental décrit. **(10 minutes)**

Activité 2 :

Travail en sous-groupes : (7 minutes)

Déduire un protocole expérimental permettant de séparer, sans dénombrer, chaque $1,8975 \times 10^6$ grains de poivre blanc. (Les grains du poivre blanc disponible sont tous relativement identiques).

Il est attendu que les élèves demandent la masse d'un groupement. L'enseignante donnera l'information suivante : $1,5 \times 10^5$ grains de poivre ont une masse de 45g.

Mise en commun (5 minutes)

Activité 3 :

Travail en sous-groupes : (10 minutes)

$5,25 \times 10^6$ grains d'une poudre de sel pèsent 4,33 grammes. Ces grains sont répartis en des sacs contenant chacun $1,5 \times 10^5$ grains. Calculer la masse d'un seul sac.

Mise en commun (5 minutes)

Mener une discussion sur les protocoles réalisés : importance du regroupement ; le choix du même nombre ; variation de la masse selon la nature des grains...

Activité 4 : Travail collectif (3 minutes)

Nommons le nombre $1,5 \times 10^5$:
et le sac :

Activité 5 : Travail individuel (5 minutes)³⁹

Compléter :

- a- 1.....de sucre contientgrains de sucre et pèseg
- b- 2,6 de sucre contiennentgrains de sucre et pèsentg
- c- 1 grain de sucre pèseg
- d- 12,3 g de sucre est la masse degrains de sucre.

Mise en commun (5 minutes)

³⁹ L'élève doit utiliser les noms de son choix mentionnés à l'activité 4 pour compléter le texte à trou.

Activité 6 : (10 minutes)

**Observer attentivement l'animation projetée par l'enseignante.
Écouter attentivement l'enseignante et prendre note.**

L'enseignante projette l'animation Scale of Universe. Elle explique en créant des liens entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique. L'enseignante explique les définitions adoptées par le SI en 2013 et elle précise le langage chimique (termes, expressions et symboles)

Activité 7 : Travail individuel (5 minutes)

Compléter :

A- Une mole d'atome de sodium a une masse de 23 g. La masse molaire atomique est 23 g.mol⁻¹

Une mole d'atome de sodium contient $(6,023 \times 10^{23})$ d'atomes de sodium

5,4 mol d'atomes de sodium contient $(5,4 \times 6,023 \times 10^{23})$ atomes de sodium

1 atome de sodium a une masse de $(23 / 6,023 \times 10^{23} \text{ unité g})$

4,6 g d'atome de sodium est la masse de $((4,6 / 23) \times 6,023 \times 10^{23})$ atomes de sodium.

B- Une mole de molécules de sucre a une masse de 180 g. C'est la masse molaire moléculaire du sucre.

Une mole de molécules de sucre contient $(6,023 \times 10^{23})$ de molécules de sucres

2,6 mol de molécules de sucre contient $(2,6 \times 6,023 \times 10^{23})$ de molécules de sucre

1 molécule de sucre a une masse de $(180 / 6,023 \times 10^{23} \text{ unité g})$

36 g de molécules de sucre est la masse de $((36 / 180) \times 6,023 \times 10^{23})$ molécules de sucre.

Mise en commun (10 minutes)

Le élèves doivent expliciter chaque calcul en traçant un tableau de proportionnalité, en verbalisant leur raisonnement avant d'écrire la réponse dans chacun des textes à trous proposés (Activité 5 et activité 7).

Exercices

La mole Exercices supplémentaires

Exercice 1 :

L'hélium est un gaz rare, pratiquement inerte, le premier de la série des gaz rares dans le tableau périodique. On le trouve dans le commerce à l'état liquide ou gaz.

Donnée : nombre d'Avogadro, $N_A = 6,023 \times 10^{23}$

Calculer le nombre d'atomes d'hélium dans 0,5 mol d'atomes.

Exercice 2 :

Le calcium est le cinquième élément le plus abondant de la croûte terrestre. Il est essentiel pour la formation des os, des dents et des coquilles.

Donnée : la masse d'une mole d'atome de calcium est $40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Calculer le nombre de moles dans un échantillon de calcium de masse 5 g.

Exercice 3 :

L'azote est l'un des principaux éléments nutritifs des plantes. La présence d'azote dans les engrais favorise la croissance des plantes et leur donne leur teinte verte foncée.

Données :

- Constante d'Avogadro $N_A = 6,023 \times 10^{23}$

- 1 mol d'atomes d'azote possède une masse de 14 g.

1- Sachant qu'une masse d'engrais contient 42 g d'azote, déterminer le nombre de moles d'atomes d'azote contenu dans cette masse d'engrais.

2- Déduire le nombre d'atomes d'azote contenus dans cette masse d'engrais.

Exercice 4 :

L'aluminium est un métal malléable, de couleur argent, remarquable pour sa résistance à l'oxydation. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre ; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète.

1- 5 mol d'atomes d'aluminium ont une masse de 135g, déterminer la masse d'une mole d'atomes d'aluminium.

2- Déduire la masse d'un atome d'aluminium.

Exercice 5 :

Une bague en or pur contient $6,11 \times 10^{21}$ atomes d'or.

1- Calculer la quantité de matière d'or dans cette bague.

2- Déduire la masse de cette bague.

Exercice 6:

Le soufre est un non-métal. On le trouve à l'état de poudre jaune utilisée en viticulture et en arboriculture comme pesticide.

Une mole d'atome de soufre a une masse de 32 g.

- a- Calculer la quantité de matière qui a une masse de 0,8 g.
- b- Calculer le nombre d'atomes contenus dans 5×10^{-3} mol d'atome de soufre.

On donne $N_A = 6,02 \times 10^{23}$

Exercice 7 :

Un élève affirme qu'une feuille d'aluminium pur (Al) de masse 10,8 g et une feuille d'or pur (Au) de masse 78,8 g contiennent le même nombre d'atomes.

Indiquer si cet élève a raison ou non.

(Les masses molaires atomiques seront données à la demande des élèves)

Évaluation

Les enseignantes ont choisi de faire l'évaluation diagnostique. Elles ont adopté les Mêmes grilles d'évaluation que celles utilisées par Marthe (l'enseignante participante qui a fait le test diagnostique à ses élèves de seconde)

B- Mésocycle 3

Activité de perfectionnement animée par l'étudiante-chercheure au cours du mésocycle 2

Objectifs de l'activité de perfectionnement :

- 1- Rappeler les caractéristiques d'une analogie.
- 2- Identifier les erreurs sémantiques en chimie.

Déroulement :

- 1- L'étudiante-chercheure a fait un retour sur les caractéristiques d'une bonne analogie et a rappelé les limites de l'analogie construite au mésocycle 2.
- 2- L'étudiante-chercheure a explicité les erreurs sémantiques en chimie.
Un échange avec les enseignantes participantes a permis de trouver plusieurs exemples. L'étudiante-chercheure a fait un retour sur l'épistémologie de ce concept pour rappeler les liens entre l'évolution socio-historique du concept et les obstacles d'apprentissage ainsi que les erreurs sémantiques.
- 3- Les enseignantes participantes ont amélioré le matériel didactique.
L'étudiante-chercheure et les enseignantes ont fait une lecture attentive des consignes en vérifiant les erreurs sémantiques.

La présentation suivante était un support à l'activité de perfectionnement

L'erreur

ANRME de perfectionnement (2) Sciences/Chimie

1

Objectifs :

1. Définir l'erreur.
2. Identifier les erreurs sémantiques en chimie

ANRME de perfectionnement (2) Sciences/Chimie

2

1. Définition

- L'erreur est une déclaration « contradictoire » avec un certain contexte accepté au préalable. Le contexte est celui d'une culture ou plus généralement celui d'une action en cours. (Brousseau, 2009)
- La remédiation est tout acte d'enseignement dont l'objectif est de permettre à l'élève de s'approprier des connaissances (savoir, savoir-faire, savoir-être, compétences méthodologiques) après qu'un premier enseignement ne lui ait pas permis de le faire, dans les formes attendues. (Charuy et Martz, 1991, p.37)

ANRME de perfectionnement (2) Sciences/Chimie

3

2. Les caractéristiques de l'erreur

Les erreurs qui paraissent significatives possèdent les caractéristiques suivantes :

- 1- elles sont reproductibles
- 2- elles ne sont pas isolées.

(Charuy et Martz, 1991)

ANRME de perfectionnement (2) Sciences/Chimie

4

3. Interprétation de l'erreur selon les perspectives d'enseignement constructiviste

(Charuy et Martz, 1991, 2004, 2011)

- Les erreurs ne sont pas erratiques et imprévisibles, elles sont constituées en obstacles. Aussi bien dans le fonctionnement du maître que dans celui de l'élève, l'erreur est constitutive du sens de la connaissance acquise (Brousseau, 1983)
- Analyse de l'erreur
 - ✓ Concernant le fonctionnement du maître :
 - la conception relative à l'enseignement et à l'apprentissage
 - le support du maître au savoir
 - la représentation qu'il a des connaissances des élèves
 - ✓ Concernant le fonctionnement de l'élève :
 - les caractéristiques individuelles
 - le support de l'élève au savoir
 - le contrat didactique

ANRME de perfectionnement (2) Sciences/Chimie

5

- Les erreurs en relation avec les caractéristiques de l'apprentissage
 - ✓ Le développement intellectuel
 - ✓ Les limitations dans le domaine du traitement de l'information (la gestion simultanée de plusieurs activités, le manque de procédures automatisées, le manque d'algorithme culturel, le manque de « faits » disponibles en mémoire à long terme)
 - ✓ Les caractéristiques individuelles (niveau de soi, le support à la discipline)
- Les erreurs en relation avec le rapport au savoir
 - ✓ Pour un concept dérivé, la notion de conception représente l'ensemble des connaissances locales (correctes ou non) qui sont attribuées à l'élève et qui permettent de rendre compte de son fonctionnement réel à l'élève (ses conceptions, ses procédures, ses raisonnements) et de l'expliquer
- Les erreurs en relation avec le contrat didactique
 - ✓ Le dévoiement de la situation donnée en présence d'un cadre dérivé

ANRME de perfectionnement (2) Sciences/Chimie

6

Les erreurs sémantiques en chimie

Exemples d'erreurs sémantiques :

✓ Concept manquant

Quelle est la masse de Cu ? Quelle est la masse d'une mole de Cu ? Quelle est la masse des atomes de Cu ?
Lire une équation à l'échelle macroscopique ou à l'échelle microscopique.
($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$)

✓ Expressions inappropriées

L'oxygène / le dioxygène / le gaz oxygène / la molécule de dioxygène

✓ Incohérence

le nombre de masse désigne la masse de l'atome

Autres de performances (2)

Autres de performances (2)

7

Références

- Berousseau, G. (2009). L'erreur en mathématiques du point de vue didactique. *Tangente Éducation*, (7), 4-7.
- Brun, J., Conne, F., Lemoine, G., & Portugais, J. (1994). La notion de schème dans l'interprétation des erreurs des élèves à des algorithmes de calcul écrit. *Cahiers de la recherche en éducation*, 7(3), 117-132.
- Charney, R., & Mante, M. (1991). De l'analyse d'erreurs en mathématiques aux dispositifs de remédiation : quelques pistes ... *Grand N*, (48), 37-64.
- Pekelag, B. et Azizoglu, N. (2013). Semantic mistakes and didactic difficulties in teaching the amount of substances concept : a useful model. *Chemistry Education Research and Praxis*, (14), 117-129.

Autres de performances (2)

Autres de performances (2)

8

Séquence d'apprentissage

La mole

Objectifs d'enseignement :

- Définir la mole.
- Établir une relation entre la quantité de matière et la masse.

Consignes de travail :

- Se répartir en sous-groupes de 3 personnes
- Répondre sur le cahier
- Bien gérer le temps de chaque activité
- Ne pas appeler l'enseignante

Activité 1 :

Travail en sous-groupes : (10 minutes)

Décrire un protocole expérimental permettant de séparer, sans dénombrer, chaque $3,75 \times 10^5$ grains identiques de sucre. (Les grains du sucre sont relativement identiques).

Mise en commun (10 minutes)

Activité 2 :

Travail en sous-groupes : (10 minutes)

Déduire un protocole expérimental permettant de séparer, sans dénombrer, chaque $1,8975 \times 10^6$ grains de poivre blanc. (Les grains du poivre blanc disponible sont identiques.)

Mise en commun (5 minutes)

Activité 3 :

Travail en sous-groupes : (10 minutes)

$5,23 \times 10^8$ grains d'une poudre de sel pèsent 4,33 grammes. Ces graines sont réparties en 35 sacs contenant chacun $1,5 \times 10^5$ graines de sel.

Calculer la masse d'un seul sac.

Calculer la masse d'un seul grain de sel.

Activité 4 : Travail individuel (5 minutes)

Donnée : On appelle le nombre

On appelle le sac :

Activité 5 : Compléter :

a- Un(e)de sucre contient grains de sucre et pèseg

- b- 2,6 de sucre contiennent grains de sucre et ont une masse deg
 c- 1 grain de sucre pèseg
 d- 12,3 g de sucre est la masse de grains de sucre.

Activité 6 : (10 minutes)

Observer attentivement l'animation projetée par l'enseignante.

Écouter attentivement l'enseignante et prendre note.

Activité 7 : Compléter :

1. Une mole de sucre a une masse de 180 g. c'est la masse molaire sucre.
2. Une mole de molécules de sucre contient de molécules de sucre.
3. 2,6 mol de molécules de sucre contient de molécules de sucre.
4. 1 molécule de sucre a une masse de
5. 36 g de poudre de sucre contiennent molécules de sucre.
6. Une mole d'atome de sodium a une masse de 23 g. La masse molaire atomique est $23\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
7. Une mole d'atome de sodium contient d'atomes de sodium
8. 5,4 mol d'atomes de sodium contiennent atomes de sodium
9. 1 atome de sodium a une masse de
10. 4,6 g d'atome de sodium contiennent atomes de sodium.
11. 4,6 g du métal sodium contiennent atomes de sodium.

Activité 8 : (10 minutes)

Déterminer le nombre de molécules de saccharose (sucre) contenu dans 50 mL de sucre.

L'élève doit peser un cylindre gradué vide.

Il doit mesurer un volume de 50mL de sucre.

Il doit mesurer la masse du sucre.

Il doit demander la masse molaire du sucre et calculer le nombre de molécules.

Exercices
Partie A

Consignes de travail :

- Se répartir en sous-groupes de 3 personnes
- Gérer le temps de chaque exercice
- Ne pas appeler l'enseignante
- Répondre sur le cahier

Vous disposez d'une balance digitale, d'une spatule, d'un verre de montre et d'une éprouvette graduée.

Exercice 1:

Travail en sous-groupe : 10 minutes

Peser une masse du métal (poudre ou lame) cuivre. Calculer le nombre de moles d'atomes de cuivre qui possède cette masse.

Mise en commun : 5 minutes

Exercice 2 :

Travail en sous-groupe : 10 minutes

Peser une masse de molécules de saccharose. Calculer le nombre de moles de molécules de saccharose qui possède cette masse.

Mise en commun : 5 minutes

Exercice 3 :

Travail en sous-groupe : 10 minutes

Vous disposez d'une éprouvette contenant 20 ml de la poudre de fer.

Calculer le nombre d'atomes de fer contenu dans ce volume.

Mise en commun : 5 minutes

Partie B

Consignes de travail :

- Se répartir en sous-groupes de 3 personnes
- Gérer le temps de chaque exercice
- Ne pas appeler l'enseignante
- Répondre sur le cahier

Chacun recevra un numéro (1, 2 ou 3) ; chacun aura 5 minutes pour résoudre individuellement un exercice (l'élève ayant le numéro 1 fera l'exercice 4 ; l'élève ayant le numéro 2 fera l'exercice 5 ; l'élève ayant le numéro 3 fera l'exercice 6).

Les élèves ayant le numéro 1 mettent en commun leur solution et la corrigent avec l'enseignante.

Chacun retourne à son sous-groupe initial et explique son exercice à ses collègues.

Exercice 4 :

L'hélium est un gaz rare, pratiquement inerte, le premier de la série des gaz rares dans le tableau périodique. On le trouve en commerce à l'état liquide ou gazeux.

Donnée : nombre d'Avogadro, $N_A = 6,023 \times 10^{23}$

Calculer le nombre d'atomes d'hélium contenus dans 0,5 mol de gaz hélium.

Exercice 5 :

Le calcium est le cinquième élément le plus abondant de la croûte terrestre. L'ion calcium (Ca^{2+}) est essentiel pour la formation des os, des dents et des coquilles.

Donnée : la masse d'une mole d'ion calcium est $40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Calculer le nombre de mole d'ion calcium contenu dans un échantillon qui a une masse 5 g d'ion calcium.

Exercice 6 :

Le diazote est le gaz le plus abondant dans l'atmosphère. La masse molaire du diazote gazeux est $28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- Sachant qu'un ballon contient 42 g de gaz diazote, déterminer le nombre de moles de diazote gazeux contenu dans le ballon.
- Déduire le nombre de molécule de diazote contenus dans ce ballon.

Partie C

Consignes de travail :

- Se répartir en sous-groupes de 3 personnes
- Gérer le temps de chaque exercices
- Ne pas appeler l'enseignante
- Répondre sur le cahier

Chaque sous-groupe fera pendant 10 minutes soit l'exercice 7 soit l'exercice 8. Les sous-groupes ayant résolu le même exercice mettent en commun pendant 5 minutes. Un délégué de chaque groupe explique la solution au groupe classe.

Exercice 7 :

L'aluminium est un métal malléable, de couleur argent, remarquable pour sa résistance à l'oxydation. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre ; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète.

1- Sachant que 135 g de l'aluminium métallique ($Al_{(s)}$) contiennent 5 mol d'atomes d'aluminium, déterminer la masse d'une mole d'atomes d'aluminium

2- Déduire la masse d'un atome d'aluminium.

Exercice 8 :

Une bague en or pur contient $6,11 \times 10^{21}$ atomes d'or.

1- Calculer la quantité de matière d'or dans cette bague.

2- Déduire la masse de cette bague.

Partie D

Travail collectif

Exercice 9 :

Le soufre est un non-métal. On le trouve à l'état de poudre jaune utilisé en viticulture et en arboriculture comme pesticide.

Une mole de soufre ($S_{(s)}$) pèse 32 g.

c- Calculer la quantité de matière contenue dans 0,8 g de poudre soufre.

d- Calculer le nombre d'atomes correspondant à cette quantité de matière.

On donne $N_A = 6,02 \times 10^{23}$

Exercice 10 :

Un élève affirme qu'une feuille d'aluminium pur ($Al_{(s)}$) de masse 10,8 g et une feuille d'or pur ($Au_{(s)}$) de masse 78,8 g contiennent le même nombre d'atomes.

Indiquer si cet élève a raison ou non.

Exercice 11 :

Le mercure est un métal liquide utilisé dans les thermomètres médicaux. Ce métal a des effets nocifs sur la santé :

- Dommages cérébraux neurologiques, en particulier chez les jeunes.
- Effets néfastes sur les reins et le système digestif.

Donnée :

- 1 ml de mercure liquide a une masse de 13,6 g.
- 36×10^{20} atomes de mercure ont une masse de 1,21 g .

1) Calculer la masse d'un seul atome de mercure.

2) Déduire la masse d'une mole d'atomes de mercure.

3) Calculer le volume occupé par $12,02 \times 10^{23}$ atomes de mercure.

Évaluation

Nom :

Consignes

- *Écrire les réponses sur la même feuille.*
- *Tenir compte du temps prévu pour chaque section.*
- *La calculatrice est autorisée.*
- *Utiliser les pages de brouillon jointes.*

Donnée :

- La constante d'Avogadro est $6,023 \times 10^{23}$

Durée : 10 minutes

1- Une statue en cuivre pèse 6,3 g. On veut calculer le nombre de mole d'atomes de cuivre dans cette statue. La masse d'une mole d'atomes de cuivre est 63 g.

a- Compléter :

1 mole d'atome de cuivre est formée de atomes de cuivre. Ce nombre est appelé ; son symbole est

b- Calculer le nombre de mole d'atomes de cuivre dans la statue.

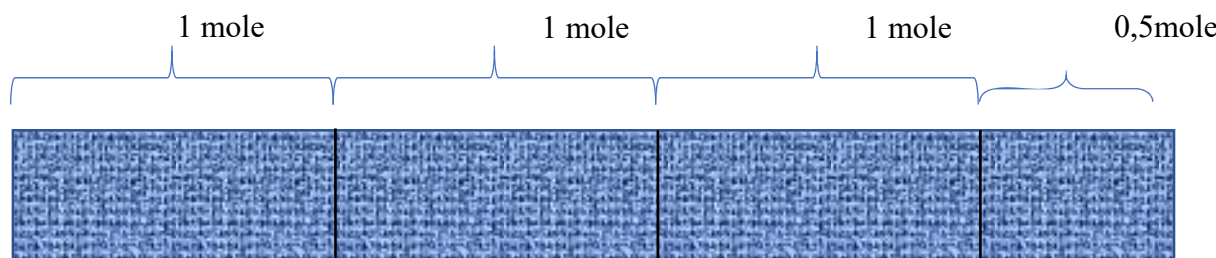
.....

c- Calculer le nombre d'atomes de cuivre dans la statue.

.....

Durée : 10 minutes

2- Le schéma suivant illustre la constitution d'une lame de fer à l'échelle microscopique.



a- Quel est le nombre de mole d'atomes dans la lame de fer ?.....

b- Quel est le nombre d'atomes de fer dans 1 mol ?

c- Quel est le nombre d'atomes de fer dans 0,5 mol ?

d- Calculer le nombre d'atomes de fer dans la lame ?

.....

3- Un morceau de sucre contient 4×10^{-3} mol de molécules de saccharose. Quel est le nombre de molécules de saccharose dans ce morceau de sucre ?

.....

Durée : 10 minutes

- 4- Calculer le nombre de mole d'atomes de fer qui pèse 1g. la masse molaire atomique du fer est 56 g.

.....
.....

- 5- Lire le texte suivant, encrer les valeurs ou les expressions qui représentent des quantités de matière.

Le sodium est un métal alcalin. Il réagit vivement avec l'eau : si on pose 1 g de sodium dans un tube à essai contenant un excès d'eau, soit 10 mL, on notera le dégagement de $0,12 \times 10^{23}$ molécules de dihydrogène soit 448 mL et la formation de $42,5 \times 10^{-3}$ mol d'hydroxyde de sodium. Le sodium est aussi un minéral retrouvé dans le corps humain dont le taux normal est 0,14 fois le nombre d'Avogadro d'ions sodium dans un litre de sang.

Durée : 5 minutes.

- 6- 2 mol d'atomes de potassium pèsent 80 g.
Trouver le volume de ces 2 mol d'atomes de potassium sachant que 1 ml de potassium pèse 0,89g.

.....
.....
.....

Grille d'évaluation des réponses des élèves (la grille est complétée sur un fichier Excel):

Dans ces grilles le critère « L'élève explicite son raisonnement » désigne que l'élève a dressé un tableau de proportionnalité ou a écrit un texte, pour mettre en lien les différentes variables.

Question 1. Une statue en cuivre pèse 630g. On veut calculer le nombre de mole d'atomes de cuivre dans cette statue. La masse d'une mole de cuivre est 63g.													
Compléter				Calculer le nombre de mole d'atomes de cuivre dans la statue.						Calculer le nombre d'atomes de cuivre dans la statue			
Élève	L'élève fait l'exercice	2 mole d'atome de cuivre est formée de 12×10^{23} atomes de cuivre	Ce nombre est appelé <i>Nombre d'Avogadro</i>	son symbole est N_A	L'élève fait l'exercice	L'élève explicite son raisonnement	L'élève effectue un calcul correct	l'élève utilise comme unité mol d'atomes	l'élève utilise comme unité mol	L'élève fait l'exercice	L'élève explicite son raisonnement	L'élève effectue un calcul correct	L'élève utilise une unité correcte

Question 2.											
L'élève indique correctement le nombre de mole d'atomes dans la lame de fer		L'élève indique correctement le nombre d'atomes de fer dans 1 mol		L'élève indique correctement le nombre d'atomes de fer dans 0,5 mol		Calculer le nombre d'atomes de fer dans la lame					
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève répond correctement	L'élève fait l'exercice	L'élève répond correctement	L'élève fait l'exercice	L'élève répond correctement	L'élève fait l'exercice	L'élève explicite un raisonnement correct	l'élève mène correctement son calcul	l'élève pose une unité correcte	

Question 3. Un morceau de sucre contient 4×10^{-3} mol de molécules de saccharose. Quel est le nombre de molécules de saccharose dans ce morceau de sucre					
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève explicite un raisonnement correct	l'élève mène correctement son calcul	l'élève pose «molécule» comme unité	l'élève pose «mol» comme unité

Question 4. Calculer le nombre de mole d'atomes de fer qui pèse 1g. la masse molaire du fer est 56g.				
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève explicite un raisonnement correct	l'élève mène correctement son calcul	l'élève pose l'unité correctement

Question 5. Encercler les valeurs ou les expressions qui représentent des quantités de matière l'élève choisit								
Élève	L'élève fait l'exercice	1g	10mL	<i>$0,12 \times 10^{23}$ molécules</i>	448mL	$42,5 \times 10^{-3}$ mol	0,14 fois	un litre

Question 6. Trouver le volume de ces 2 mol de potassium sachant que 1 ml de potassium pèse 0,89g.				
Élève	L'élève fait l'exercice	L'élève explicite un raisonnement correct	l'élève mène correctement son calcul	l'élève écrit une unité correcte

C- Mésocycle 4

Activité de perfectionnement animée par la chercheuse au cours du mésocycle 4

Objectifs de l'activité de perfectionnement :

- 1- Rappeler les différents objectifs traités au cours des activités de perfectionnement des mésocycles précédents.
- 2- Faire un retour sur l'évolution socio-historique du concept

Déroulement :

- 1- L'activité de perfectionnement a commencé par un retour sur : construire les bonnes analogies, enseigner la modélisation, éviter les erreurs sémantiques.
- 2- L'étudiante-chercheuse a animé une discussion autour d'un extrait (les paragraphes 1) Introduction et 2) Stoichiometry as a Nuclear Research in the Birth of Chemistry as a Modern Science) de l'article Padilla, K. et Furió-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 and Education*, 17(4), 403-424.
- 3- Les enseignantes ont construit la présentation suivante sur le repère culturel :
Le matériel didactique est celui adopté au mésocycle 3. Les enseignantes ont ajouté le diaporama sur les repères culturels

Diaporama repères culturels

Repères culturels

❖ Les alchimistes ont réalisé des transformations chimiques en vue de retrouver l'eau de vie ou de transformer la matière.



❖ **Richter**, un mathématicien, voulait faire les mathématiques en chimie : l'étude quantitative des réactions chimiques commence.





















Il est le père de la stœchiométrie (stoicheion = élément ; metron = mesure)

C'est la naissance de la chimie comme science moderne!

❖ *ais Richter considérait la matière continue ; il chercha des proportions en masses. L'étude des réactions était alors à l'échelle macroscopique*



Eléments simples de Dalton

 Hydrogène	 Azote	 Carbone	 Oxygène	 Phosphore
 Soufre	 Magnesium	 Lithium	 Sodium	 Potassium
 Strontium	 Baryum	 Fer	 Zinc	 Cuivre
 Plomb	 Argent	 Platine	 Or	 Mercure

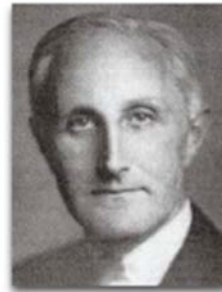
❖ *L'étude de la matière à l'échelle microscopique a commencé quand Dalton et Bohr proposent que la matière est formée d'atomes*

Wilhelm Ostwald, un chimiste allemand, ne croyant pas à l'atome définit la mole ainsi:
la mole étant la masse d'une substance, exprimée en grammes, et dont la valeur est équivalente à la masse molaire relative.



❖ Comme le concept de l'atome a évolué et s'est distingué du concept de la molécule, Le concept de la mole a aussi évolué pour devenir une façon de compter les atomes et les molécules.

❖ Définition de la mole en 1961 selon Guggenheim:
c'est la quantité de matière qui contient le même nombre d'entité élémentaire que 12g de C-12



Les travaux d'Avogadro (un scientifique italien) permettent de définir la constante d'Avogadro qui est la quantité d'atome C-12 qui pèse 12g.

- **Récemment la mole est définie comme l'unité de la quantité de matière.**
- **Le concept de la quantité de matière est le principal concept qui relie le domaine microscopique (atomes, ions, électrons, molécules ...) au domaine macroscopique (ce que nous observons)**

Références des images

- https://www.google.ca/search?q=alchimiste&client=firefox-b&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiy3s_ypsXaAhVLj1kKHRV9BxcQ_AUICigB#imgrc=sB9UgRDKHjvrbM:
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Jeremias_Benjamin_Richter#/media/File:Jeremias_Benjamin_Richter.jpeg

Annexe 10 : Guide de discussion du groupe de discussion (Phase d'évaluation et de réflexion)

Objectifs :

- Identifier les effets de la formation sur le développement des connaissances disciplinaires chez les enseignants.
- Identifier les effets de la formation sur le développement des connaissances didactiques chez les enseignants.
- Identifier les effets de la formation sur l'engagement des enseignants dans un processus de formation continue.

Thème	Sous-thème	Durée estimée	Questions
Le groupe élève	Le niveau.	15 minutes	1- Quel est le niveau moyen de vos élèves ? Comparer avec les promotions précédentes. 2- Quels sont les biais préférentiels de ces élèves ? (points forts et points faibles) 3- Sont-ils issus de milieu favorisé ou défavorisé ?
L'expérimentation	Le déroulement général des séances.	45 minutes	1- Comment pourriez-vous décrire, de façon générale, le déroulement des 6 séances ? 2- Quelles modifications proposeriez-vous à cette expérimentation?
	L'engagement des élèves.		1- Comment pourriez-vous décrire la motivation des élèves ? 2- Comment pourriez-vous décrire leur engagement ?
	Effets sur les pratiques enseignantes.		1- Comment cette expérimentation va-t-elle modifier vos pratiques futures ? 2- Prévoyez-vous repenser vos préparations ? 3- Craignez-vous la gestion du temps de ce type de séances ? 4- Quel est l'effet de cette formation sur votre développement professionnel ? 5- Quels sont les effets de la formation sur vos connaissances disciplinaires ? 6- Quels sont les effets de la formation sur vos connaissances en acte ?
	Formation continue.		1- Aimerez-vous participer à un autre DBR ? 2- Quel concept choisiriez-vous ?

Annexe 11 : Guide de discussion de l'entrevue individuelle

Thème	Sous-thème	Durée estimée	Questions MARGES
Accueil		Quelques minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- Remerciements pour la participation. 2- Décrivez la formation d'une façon générale.
La mise à l'essai	L'enseignement et l'apprentissage.	45 minutes	<ol style="list-style-type: none"> 1- Comment évaluez-vous l'apprentissage du concept de mole par vos élèves ? 2- Comment évaluez-vous votre enseignement du concept de la mole ?
	La formation.		<ol style="list-style-type: none"> 1- Comment pourriez-vous décrire la formation en général ? 2- Étiez-vous capable de construire une telle séquence toute seule ? 3- Décrivez le travail en équipe (avantages et inconvénients). 4- Précisez les points forts et les points faibles de cette formation.
	Effets sur les pratiques enseignantes.		<ol style="list-style-type: none"> 1- Expliquez les effets de cette formation sur votre enseignement ? 2- Quels sont les apports bénéfiques de la formation à votre enseignement ? 3- Quels sont les effets négatifs ressentis sur votre enseignement ? 4- Au début de la formation, vous avez présenté votre préparation des années précédentes. Comment la trouvez-vous maintenant ? 5- Décrivez en un seul mot comment vous trouvez votre enseignement après cette formation ?
	Formation continue.		Seriez-vous intéressée par un nouveau DBR ? Expliquez les raisons / choisissez un concept.