UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté d'éducation

L'enseignement de la chimie avec les environnements éducatifs mobilisant la réalité virtuelle : analyse documentaire

par

Nicolas-Félix Lacombe

Mémoire présenté à la Faculté d'éducation

en vue de l'obtention du grade de

Maître en sciences de l'éducation

640-000-05-20203

3 Janvier

© Nicolas-Félix Lacombe 2024

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté d'éducation

L'enseignement de la chimie avec les environnements éducatifs mobilisant la réalité virtuelle :

analyse documentaire

par

Nicolas-Félix Lacombe

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Fatima Bousadra Directrice de la recherche
Université de Sherbrooke

Elijah van Houten Codirecteur de la recherche
Université de Sherbrooke

Jean Gabin Ntebutse Membre du jury
Université de Sherbrooke

Michel Huneault Membre externe du jury
École de technologie supérieure

Mémoire accepté le 3 janvier 2024

SOMMAIRE

Dans le contexte de la popularité croissante de la réalité virtuelle dans le domaine de l'éducation, il est important de comprendre comment cette technologie pourrait avoir un impact sur les apprentissages des élèves et de documenter les usages effectifs de ces technologies au regard des attentes auxquelles elles sont censées répondre. Maintes recherches ont montré que globalement, malgré le potentiel annoncé initialement par leurs concepteurs, les technologies antécédentes ont eu un effet limité sur les apprentissages disciplinaires prescrits. Cela s'explique, entre autres, par la difficulté d'intégrer efficacement l'usage didactique de ces technologies dans les pratiques d'enseignement. Au-delà des considérations motivationnelles, les conditions de la conciliation des contraintes didactiques d'un savoir donné et les caractéristiques techniques offertes par n'importe quel environnement technologique nous semblent importantes à comprendre pour garantir les apprentissages souhaités. Ce mémoire est une contribution en ce sens. Nous avons ciblé le domaine de la chimie pour lequel on retrouve une abondance d'environnements virtuels qui lui sont dédiés. Plus spécifiquement, nous avons étudié comment ces environnements conjuguent les caractéristiques de la démarche de modélisation, démarche typique en chimie, et les tâches proposées aux élèves en fonction des intentions d'apprentissage annoncées.

Définir les attentes envers une technologie éducative suppose de comprendre l'enjeu qu'elle pourrait résoudre, dans notre cas, les difficultés dans l'apprentissage de la chimie. La problématique recense les difficultés des élèves face à l'apprentissage des notions de base dans les écoles secondaires du Québec et d'ailleurs, et les technologies utilisées pour soutenir les personnes enseignantes de sciences. L'analyse des difficultés d'apprentissage des élèves montre que la

modélisation est nécessaire pour soutenir les élèves dans l'apprentissage des concepts de chimie, alors que les limites de l'impact des technologies non immersives sur l'apprentissage de la chimie mettent en lumière les limites rencontrées dans l'articulation de la modélisation et du fonctionnement des technologies développées. L'objectif général de ce mémoire, soit de décrire le traitement didactique associé à la modélisation en chimie lors du recours à la réalité virtuelle, découle de ce besoin de transposition des contraintes didactiques de la modélisation dans l'utilisation de la réalité virtuelle pour l'enseignement-apprentissage de la chimie.

Pour aborder cet objectif d'un point de vue théorique, nous avons convoqué différents travaux en didactique de la chimie sur la relation entre la modélisation et sa transposition dans la réalité virtuelle. Cette relation est établie en articulant les caractéristiques d'une démarche de modélisation, le modèle du tétraèdre chimique, pour définir le rôle et les caractéristiques du modèle en chimie, le modèle d'apprentissage situé dans les technologies immersives et la théorie de l'apprentissage cognitif multimédia, qui définissent comment les contraintes de l'apprentissage peuvent être articulées aux contraintes technologiques. L'opérationnalisation de ce cadre conceptuel nous a permis de définir comment les tâches des élèves et les modèles scientifiques associés à la modélisation en chimie pourraient être transposés dans une démarche d'enseignement-apprentissage de la chimie lors du recours à la RV. Pour déterminer si et comment cette transposition s'est concrétisée dans les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie avec la réalité virtuelle, trois objectifs spécifiques sont ciblés : l'identification des intentions d'apprentissage associées à la RV en chimie; l'identification des modalités de mise en relation du contexte de la réalité virtuelle et des tâches d'apprentissage proposées dans l'environnement virtuel; et l'analyse comparative entre les actions générées par l'environnement

virtuel que l'élève doit exécuter et les conditions didactiques requises pour des tâches de modélisation en chimie.

Sur le plan méthodologique, pour répondre à ces objectifs, nous avons réalisé une analyse documentaire des recherches scientifiques empiriques publiées en français et en anglais sur l'enseignement-apprentissage de la chimie avec la réalité virtuelle entre 2010 et 2023. L'analyse détaillée des protocoles méthodologiques de recherche utilisés dans chaque recherche nous a permis à la fois d'identifier les plateformes en RV dédiées à la chimie, mais aussi les tâches d'apprentissage associées aux intentions d'apprentissage ciblées par l'environnement virtuel.

Les résultats de notre analyse mettent en évidence que la RV est majoritairement utilisée comme un environnement permettant l'illustration concrète des concepts théoriques dans l'enseignement des structures chimiques. Si on considère la structure globale des séquences didactiques, l'illustration des notions abstraites semble avoir pour fonction première la visualisation. On suppose que l'élève comprendra mieux s'il arrive à visualiser les interactions ou la structure chimique. Tout se passe comme si l'environnement de la RV se substitue aux images ou aux animations habituellement utilisées en classe de chimie.

Cette utilisation renseigne sur la signification attribuée aux caractéristiques de la modélisation dans l'enseignement-apprentissage de la chimie avec la RV par les concepteurs des environnements de la RV et par la recherche sur les apprentissages des élèves en chimie dans le contexte du recours à la RV. À quelques exceptions près, nous constatons que malgré le caractère innovant associé à la RV, les recherches sur l'enseignement de la chimie avec cette technologie ne semblent pas encore exploiter adéquatement les potentiels techniques offerts par les technologies

immersives. Les études analysées montrent que la grande majorité des environnements proposent des tâches d'apprentissage qui demeurent encore dans une vision traditionnelle qui occulte les savoirs en didactiques de la chimie sur les obstacles épistémologiques largement documentés durant les trois dernières décennies. En effet, au-delà de l'effet sensoriel réaliste induit par l'environnement virtuel, l'enchainement des tâches de l'élève reprend indirectement un enseignement magistral exposant l'élève à des notions théoriques doublées de moyens de visualisation sans questionner le sens derrière les tâches proposées. Cet usage, largement dominant dans les recherches analysées, montre que jusqu'à présent, l'industrie de la RV intègre très faiblement les caractéristiques de la démarche de modélisation en chimie d'un point de vue didactique.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION **1**

PREMIER CHAPITRE. LA PROBLÉMATIQUE **4**

1. LE CONTEXTE DE L'ÉTUDE : LES ENJEUX DE LA MISE EN ŒUVRE D'UNE VISION SYSTÉMIQUE ET COMPLEXES DES SAVOIRS SCIENTIFIQUES EN ÉDUCATION SCIENTIFIQUE 4
   - 1.1 L'approche intégrative dans l'enseignement des sciences : une orientation forte dans les programmes de l'école québécoise 5
   - 1.2 La clé de voûte de l'approche intégrative dans l'enseignement de la chimie : la stœchiométrie 6
2. LA STŒCHIOMÉTRIE, CADRE D'ANALYSE FONDAMENTAL POUR L'ANALYSE DES PHÉNOMÈNES CHIMIQUES 7
   - 2.1 La stœchiométrie : une composante principale porteuse de plusieurs défis lors de l'apprentissage 8
   - 2.2 Le langage chimique, des chiffres et des lettres sans mot 11
3. LES DÉMARCHES D'ENSEIGNEMENT DE LA STOECHIOMÉTRIE : UN DÉFICIT DANS LA PRISE EN CHARGE DES COMPOSANTES DIDACTIQUES 15
   - 3.1 L'utilité des modèles pour structurer les représentations 19
   - 3.2 Les modèles des élèves de la structure atomique 22
   - 3.3 Les obstacles des élèves face à l'équilibre chimique 24
4. LA MODÉLISATION : ANGLE D'APPROCHE DE NOTRE RECHERCHE 27
5. LES TECHNOLOGIES IMMERSIVES DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE : UNE VOIE PROMETTEUSE POUR FAVORISER LA MODÉLISATION 30
   - 5.1 Les technologies utilisées dans l'enseignement de la chimie 30
     - 5.1.1 Les logiciels 31
     - 5.1.2 Les animations 34
     - 5.1.3 Les expérimentations assistées par ordinateur (EXAO) 35
     - 5.1.4 Les simulateurs 37
   - 5.2 Les technologies immersives : des développements technologiques qui compensent les limites humaines pour mieux appréhender la complexité des savoirs scientifiques 39
6. LES TECHNOLOGIES IMMERSIVES : APPORT DES ÉCRITS SCIENTIFIQUES 41

6.1.1 Avantages et bénéfices 42
6.1.2 Limites 44
7. SYNTHÈSE ET OBJECTIF GÉNÉRAL DE RECHERCHE 47
DEUXIÈME CHAPITRE. LE CADRE DE RÉFÉRENCES 50
1. L'ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE DE LA STŒCHIOMÉTRIE 50
1.1 La modélisation, articulation entre l'empirique et le théorique 53
1.2 La problématisation, l'ancrage contextuel qui donne sens au modèle 56
1.2.1 Le problème initial, une phénoménographie pour le novice 57
1.2.2 Le problème reconstruit, réinterprétation phénoménologique 59
1.3 La représentation mentale, clé de voûte de l'interprétation des expériences 60
2. LA STRUCTURE DES REPRÉSENTATIONS ET DES MODÈLES EN CHIMIE 63
3. EN SYNTHÈSE 67
4. LA RÉALITÉ VIRTUELLE : POINT DE VUE DIDACTIQUE 68
4.1 L'apprentissage par le contexte 69
4.2 L'interaction entre le contexte et les propriétés technologiques 71
4.2.1 Les contraintes de la présentation du savoir 72
4.2.2 Les contraintes de la mise en action de l'élève 73
5. SYNTHÈSE ET OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DE RECHERCHE 75
TROISIÈME CHAPITRE. LA MÉTHODOLOGIE 76
1. TYPE DE RECHERCHE 76
2. L'ANALYSE DE CONTENU DOCUMENTAIRE 77
2.1 La constitution du corpus 78
2.2 Critères d'inclusion 79
3. PROCÉDURE DE TRAITEMENT DE DONNÉES 80
3.1 Première partie-Provenance des écrits 81
3.2 Deuxième partie-Apprentissages ciblés 81
3.3 Troisième partie- Intégration des modèles 82
3.4 Quatrième partie-la tâche de représentation 82
3.5 Cinquième partie- Contexte de la RV 83
3.6 Sixième partie – Synthèse 84

QUATRIÈME CHAPITRE. LES RÉSULTATS 85

1. DONNÉES DESCRIPTIVES DES ÉCRITS RECENSÉS 85

2. ANGLES D'APPROCHES ADOPTÉS DANS LES RECHERCHES UTILISANT LA RV : PORTRAIT GLOBAL 87

2.1 Perceptions du personnel professionnel utilisateur de la RV 89

2.2 Liens entre l'utilisation par l'élève de la RV et des dimensions psychopédagogiques 90

2.2.1 Des liens entre l'utilisation de la RV et des facteurs motivationnels 90

2.2.2 Des liens entre l'utilisation de la RV et la perception de mieux apprendre ... 91

2.2.3 Des liens entre l'utilisation de la RV et les résultats académiques des élèves 92

2.3 En synthèse 92

3. LIENS ENTRE L'USAGE DE LA RV ET L'APPRENTISSAGE DES SAVOIRS DISCIPLINAIRES EN CHIMIE 93

3.1 Les apprentissages liés aux structures moléculaires 93

3.2 Les apprentissages liés à la modélisation des interactions chimiques 98

3.3 En synthèse 105

4. L'ARTICULATION DIDACTIQUE ENTRE L'ENVIRONNEMENT EN RV ET LA STRUCTURE DE LA TÂCHE D'APPRENTISSAGE EN CHIMIE 106

4.1 Les fonctions d'usage de la RV 108

4.2 L'environnement expérimental : la place et l'usage des données scientifiques 109

5. LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION ET L'ENVIRONNEMENT DE RV : NATURE DES APPRENTISSAGES MIS EN JEU 111

5.1 Thèmes scientifiques associés à la modélisation 111

5.2 L'articulation des connaissances dans l'apprentissage des thèmes scientifiques 112

5.3 Les types de savoirs mobilisés dans les recherches 117

6. LES ACTIVITÉS DES ÉLÈVES DANS LES ENVIRONNEMENTS RV : LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION EN ACTION 118

6.1 L'intégration des modèles 119

6.1.1 La présence de modèles 120

6.1.2 Les usages des modèles pour impliquer l'élève dans l'apprentissage 121

6.1.3 Le pouvoir d'action des élèves sur les modèles 124

6.2 La tâche de représentation : l'articulation des connaissances dans l'acte d'apprentissage 130

6.2.1 Présence de tâche de représentation 130
6.2.2 Utilisation des modèles en RV pour explorer les limites des explications avec le modèle 132
6.3 Les problèmes scientifiques 135
7. INTÉGRATION DE L'ENSEMBLE DES CONTRAINTES DE LA MODÉLISATION 136
CONCLUSION 140
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 148
ANNEXE A. GRILLE D'ANALYSE UTILISÉE 171
ANNEXE B. LISTE DES RECHERCHES RETENUES 175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Niveaux scolaires ciblés dans les recherches répertoriées 85
Tableau 2. Niveaux scolaires ciblés dans les recherches répertoriées 86
Tableau 3. Thèmes adoptés dans les recherches utilisant la RV 87

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma de modélisation selon Martinand (2002) 54
Figure 2. Tétraèdre chimique selon Kermen et Méheut (2009) 65
Figure 3. Proportions des différents rôles de RV dans les activités 108
Figure 4. Proportions d'activités impliquant une expérimentation 110
Figure 5. Thèmes des activités 112
Figure 6. Proportions des différentes articulations entre concept, expérience et système de communication pour les différents thèmes d'apprentissage 115
Figure 7. Type de savoirs ciblés dans les recherches 118
Figure 8. Proportions d'activités présentant un modèle 121
Figure 9. Proportions des types de modèles rencontrés dans l'activité 123
Figure 10. Proportions des modèles observables 125
Figure 11. Proportions des modèles hypothétiques 126
Figure 12. Proportions des modèles modifiables 127
Figure 13. Proportions des modèles contextualisés 128
Figure 14. Proportions des modèles scientifiques 129
Figure 15. Proportions d'activités impliquant une tâche de représentation 131
Figure 16. Proportions de recherches intégrant une tâche d'application du modèle dans de multiples expériences 134
Figure 17. Proportions des activités présentant un problème scientifique 136
Figure 18. Proportions des activités prenant en compte les contraintes de la modélisation. 138

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

TI	Technologie immersive
RV	Réalité virtuelle
RA	Réalité augmentée
RM	Réalité mixte
PFEQ	Programme de formation de l'école québécoise
PGA	Progression des apprentissages
EXAO	Expérimentation assistée par ordinateur

À un même niveau d'entraînement, la lance est légèrement plus puissante; mais la lance comme la hallebarde ne servent que dans certaines situations et se révèlent inefficaces au combat rapproché. Ce sont des armes uniquement en usage sur le champ de bataille, mais dans l'urgence de la bataille, elles se révèlent indispensables. Cependant, vous contenter d'éprouver l'efficacité de ces principes dans une salle d'exercice, en étudier jusqu'aux moindres détails en oubliant la Voie de la réalité ne vous sera que de peu d'utilité.

Gorin no sho, attribué à Miyamoto Musashi

À Shihan Daniel Michaud, qui m'a enseigné que la détermination soigne tant les blessures que les rêves.

REMERCIEMENTS

L’achèvement de ce travail ne m’aurait pas été possible sans le soutien de nombreuses personnes. En premier lieu, je remercie ma directrice, Pre Fatima Bousadra, pour son recadrage et son mentorat, et Elijah van Houten, pour son regard pragmatique dans les projets auxquels j’ai participé. Le monde de la recherche m’a paru moins seul et moins obscur grâce à leur accompagnement.

Je tiens également à remercier Cristian Merino Rubilar, Mareike Frevert, Hendrik Peeters, Gergely Katona, Rianne van Dinther, Manuel Krug et Elliot Hu-Au, qui m’ont donné accès à leurs plateformes ou leurs données pour compléter mon analyse documentaire. Je remercie également Manisha Pandey, Michelle Miller, Philip G. Crandall, Maryam Abdinejad, Chiu Mei-Hung, qui ont pris le temps de répondre à la requête d’un étudiant étranger.

Je dois aussi mentionner ma reconnaissance envers Daniela Fernandes et Louis Hamel, qui ont traduit des documents afin de m’aider dans l’analyse des données.

Enfin, merci à ma famille, qui donne un sens et une raison d’être à ce labeur.

INTRODUCTION

Depuis plus d'une trentaine d'années, les recherches en didactique des sciences ont permis d'identifier plusieurs problèmes liés aux apprentissages des élèves en chimie, et ce, à tous les niveaux scolaires (Canac et Kermen, 2018; Chi, 2005; Tyson et al., 1999). La constance et la récurrence des conceptions alternatives des élèves notées dans les recherches montrent que malgré les nombreuses réformes dans plusieurs programmes d'éducation, des problèmes didactiques centraux de l'enseignement de cette discipline n'ont pas été résolus (Canac et Kermen, 2018; Laugier et Dumon, 2004). Ce projet de mémoire cherche à clarifier pourquoi les élèves ont encore à ce jour des difficultés à comprendre les notions essentielles de la chimie et établir si les technologies immersives peuvent favoriser un meilleur apprentissage de la chimie.

Dans la problématique, nous décrivons les difficultés des élèves face à l'apprentissage des notions de base dans les écoles secondaires du Québec et d'ailleurs, et les technologies utilisées pour soutenir les personnes enseignantes de sciences. La première rubrique présente les orientations officielles du programme scolaire québécois pour les sciences. La seconde rubrique présente la notion de stœchiométrie et ses relations avec les visées du programme et les difficultés des élèves. La troisième rubrique aborde les contradictions entre les besoins des élèves pour apprendre la chimie et les démarches d'enseignement utilisées au Québec. La quatrième rubrique présente la modélisation, la démarche didactique au cœur de cette recherche. La cinquième rubrique présente un survol des technologies utilisées pour enseigner la chimie et certaines de leurs caractéristiques. La sixième rubrique précise les caractéristiques et l'état des connaissances en ce

qui concerne les technologies immersives, qui sont au centre de ce mémoire. Enfin, la septième rubrique fait une synthèse de la problématique et présente l'objectif général de la recherche.

Dans le cadre de références, la relation entre la modélisation et sa transposition dans les technologies immersives est abordée. La première rubrique décrit en profondeur la modélisation et établit les conditions essentielles pour la réaliser. La seconde rubrique décrit la structure épistémologique des modèles en chimie et précise comment les connaissances sont articulées dans cette discipline. La troisième rubrique présente une synthèse des conditions nécessaires à la modélisation en chimie. La quatrième rubrique décrit comment ces conditions peuvent être transposées dans différents éléments des technologies immersives. La cinquième rubrique présente la synthèse des rubriques précédentes ainsi que les objectifs spécifiques de recherche.

Dans la méthodologie, le choix de l'analyse documentaire est expliqué et justifié. La première rubrique décrit notre type de recherche. La seconde rubrique présente l'analyse documentaire et son opérationnalisation dans le mémoire. La troisième rubrique présente la procédure de traitement de données élaborée.

Dans le chapitre des résultats, l'analyse des recherches empiriques sur l'enseignement-apprentissage de la chimie avec la RV et sa correspondance avec la modélisation est présentée. La première rubrique présente les données descriptives des écrits recensés. La seconde rubrique présente les résultats des recherches qui n'ont pas porté sur les apprentissages disciplinaires. La troisième rubrique présente les résultats de recherches sur l'impact de la RV sur les apprentissages disciplinaires. La quatrième rubrique présente l'analyse de l'articulation didactique entre les contextes générés par la RV et la tâche de l'élève. La cinquième rubrique présente les

apprentissages mis en jeu dans les recherches retenues et leur articulation avec la modélisation. La sixième rubrique présente les tâches des élèves dans les recherches retenues et leur articulation avec la modélisation. La septième rubrique présente l'articulation des conditions de la modélisation abordées dans les rubriques précédentes.

La conclusion présente un retour sur l'ensemble de la démarche du mémoire et une interprétation brève des résultats du mémoire sur l'utilisation actuelle de la RV pour répondre aux besoins des élèves dans l'apprentissage de la chimie. Les limites des résultats et de la recherche sont également présentées.

PREMIER CHAPITRE. LA PROBLÉMATIQUE

En ce début de 21e siècle, l'humanité fait face à plusieurs enjeux directement liés aux sciences, par exemple les changements climatiques, la pandémie de COVID-19, la perte de la biodiversité et l'accumulation de produits toxiques dans les sols et les eaux. La compréhension de ces enjeux requiert une compréhension globale et profonde tant du processus scientifique que des concepts scientifiques. Dans ce chapitre, nous allons présenter les défis et les difficultés que rencontrent les élèves dans le développement de cette vision systémique dans le cadre de l'apprentissage de la chimie. Nous allons d'abord mettre en lumière les relations entre les obstacles didactiques que rencontrent les élèves et les raisonnements de ces derniers. Nous allons ensuite relier ces obstacles à la démarche d'enseignement.

1. LE CONTEXTE DE L'ÉTUDE : LES ENJEUX DE LA MISE EN ŒUVRE D'UNE VISION SYSTÉMIQUE ET COMPLEXES DES SAVOIRS SCIENTIFIQUES EN ÉDUCATION SCIENTIFIQUE

Pour introduire notre objet de recherche, prenons l'exemple du réchauffement climatique. La communauté scientifique convient que ce phénomène ne peut être étudié exclusivement par la météorologie, puisque le blanchiment des coraux, l'acidification des eaux et la pollution de l'atmosphère et de l'hydrosphère sont traités par des recherches en biologie, en écologie et en chimie. De plus, pour comprendre l'acidification des eaux, il faut se référer aux principes chimiques de la dissolution des gaz et des réactions chimiques qui produisent des gaz à effet de serre acides, ainsi que les principes biologiques du rôle du pH dans l'équilibre des cellules vivantes

et le rôle des végétaux aquatiques dans le contrôle de la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. Les causes et les conséquences de cet enjeu ne sont donc pas exclusivement météorologiques ou physiques, mais englobent la biologie, la chimie et l'écologie.

C'est sur la base de cet exemple et maints autres que depuis plusieurs années des philosophes, des sociologues des sciences et des didacticiens des sciences comme Fourez (2007), Fuller (2010), Astolfi (2008) et Martinand (2010, 2014) préconisent un enseignement des sciences visant une compréhension des concepts scientifiques systémique, globale, décloisonnée et applicable plutôt que la formation de spécialistes de théories disciplinaires aux compétences cloisonnées à leurs domaines. Cet état de fait met en évidence la nécessité d'une démarche de conceptualisation des connaissances scientifiques, puisque pour exporter une idée scientifique vers une application visible dans un phénomène différent de son origine théorique, il faut en comprendre le fonctionnement interne et transposer ce fonctionnement en manifestation externe. D'autre part, un tel programme implique une éducation scientifique dirigée vers l'ensemble de la population, puisque les personnes en dehors des disciplines scientifiques auront besoin de comprendre, de prendre position et de contribuer à la résolution de ces enjeux (Fuller, 2010).

1.1 L'approche intégrative dans l'enseignement des sciences : une orientation forte dans les programmes de l'école québécoise

Le système éducatif québécois s'inscrit dans cette perspective en intégrant dès 2001 ces enjeux dans le Programme de formation de l'école québécoise (PFEQ) (MÉES, 2012). De plus, il est mentionné dans le programme « le besoin fréquent de faire appel aux contenus et aux méthodes de plusieurs de ces champs [scientifiques] pour résoudre des problèmes ou phénomènes

scientifiques de plus en plus complexes pour construire son opinion au regard de grandes problématiques scientifiques et technologiques » (Gouvernement du Québec, 2012, p. 2-3). Le PFEQ semble donc adopter cette vision décloisonnée des sciences. Toutefois, la Progression des apprentissages (PGA) ne met pas en évidence de façon explicite les interactions entre les concepts de différentes disciplines scientifiques. Par exemple, en ce qui concerne les réchauffements climatiques, la PGA (Gouvernement du Québec, 2011) indique que l'élève doit « décrire les effets de serre » (p. 31) et « expliquer des conséquences de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (ex. : réchauffement climatique pouvant causer la hausse du niveau de la mer, une perturbation des écosystèmes, la fonte des glaciers) » (p. 31). Tous ces exemples reposent sur l'aspect écologique du phénomène, sans aborder les aspects chimiques à la base du phénomène, ce qui réduit le caractère intégrateur des connaissances scientifiques.

1.2 La clé de voûte de l'approche intégrative dans l'enseignement de la chimie : la stœchiométrie

Un domaine scientifique où la compréhension systémique est particulièrement importante est la stœchiométrie. La stœchiométrie est l'ensemble de calculs entourant les quantités de matière qui se transforment dans une réaction chimique. C'est une notion fondamentale dans les programmes prescrits au Québec et ailleurs, car elle est présente dans tous les cycles du secondaire (de la deuxième année jusqu'à la cinquième année), par le biais des modèles atomiques, de la loi de la conservation de la masse, du balancement des équations chimiques, de la vitesse de réaction chimique et de l'équilibre chimique (Gouvernement du Québec, 2011). C'est également une notion intégratrice, puisqu'elle implique de nombreux phénomènes abordés dans le programme, comme

la digestion, la photosynthèse, la respiration, le réchauffement climatique et la combustion (Gouvernement du Québec, 2011). De ce fait, la compréhension de la stœchiométrie est nécessaire pour développer une compréhension systémique de phénomènes scientifiques. La prochaine section présente les orientations du programme concernant l'enseignement de la stœchiométrie.

2. LA STŒCHIOMÉTRIE, CADRE D'ANALYSE FONDAMENTAL POUR L'ANALYSE DES PHÉNOMÈNES CHIMIQUES

Dans un document officiel qui détaille la progression des apprentissages attendus des élèves, le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MÉES) stipule que dès la quatrième année du secondaire, les élèves doivent être en mesure de décrire une réaction de combustion, donner des exemples de réaction acidobasique, d'expliquer le principe de Lavoisier (conservation de la masse), d'équilibrer des réactions chimiques, déterminer des quantités de produits ou de réactifs impliqués dans une réaction chimique (Gouvernement du Québec, 2011).

Toutes ses opérations sont liées à la stœchiométrie, qui est la base de l'étude quantitative de la chimie. Être capable de quantifier les résultats d'une réaction chimique est essentiel pour être en mesure de comprendre les phénomènes de réactions endothermiques et exothermiques, de déterminer des vitesses de réaction, comprendre les phénomènes d'oxydoréduction, la loi des gaz parfaits et interpréter des résultats qui impliquent une réaction chimique. La compréhension des changements chimiques est également essentielle dans toutes les disciplines où ils ont lieu, ce qui implique l'écologie, la biologie, la biochimie, la microbiologie, etc. La compréhension du fonctionnement du corps, qui implique énormément de réaménagement de structures chimiques, dont la digestion est un exemple, ou la schématisation de l'impact d'un polluant sur un écosystème

sont toutes deux directement liées à la capacité de visualiser une réaction chimique. Une étude aux États-Unis a démontré que la maîtrise de la stœchiométrie était le facteur le plus important pour la réussite des programmes de chimie au collège, qui est l'équivalent américain du cégep (Tai et al., 2006, p. 1709).

2.1 La stœchiométrie : une composante principale porteuse de plusieurs défis lors de l'apprentissage

La stœchiométrie implique essentiellement des changements d'unités, des calculs de proportions, des logarithmes, des exposants, et l'interprétation de graphiques (Tai et al., 2006, p. 1709). De facto, les capacités de résoudre rapidement des équations, d'isoler des variables et d'interpréter les résultats à partir d'un graphique facilitent énormément l'application des connaissances dans des contextes de plus haut niveau (Tai et al., 2006, p. 1709).

Pourtant, la seule maîtrise des habiletés mathématique n'est pas suffisante pour maîtriser la stœchiométrie : les élèves ne faisant pas le lien entre les équations et les phénomènes scientifiques développent des démarches moins efficaces pour résoudre des problèmes complexes ou contextualisés (BouJaoude et Barakat, 2003). Ces élèves appliquent des algorithmes mathématiques sans comprendre ce que représentent les variables ou le problème à résoudre, ce qui les entraîne à effectuer des calculs qui n'ont pas un lien avec le problème (BouJaoude et Barakat, 2003). Ce problème avait déjà été constaté par Tyson, Treagust et Bucat (1999) à travers les obstacles rencontrés par les élèves face à l'équilibre chimique. Ces auteurs ont constaté que les élèves rencontrent de nombreuses difficultés pour résoudre les équations de vitesse de réaction qui impliquent des solides, certains ne faisant pas la différence entre l'effet d'un solide et celui d'ions

dissous, alors que d'autres pensent que les solides ne sont jamais impliqués dans les équations (Tyson et al., 1999). Par ailleurs, bien des élèves ne font pas la différence entre le rôle d'un solvant et le rôle d'un réactif dans les réactions qui impliquent de l'eau (Tyson et al., 1999). Dans la même veine, Kermen (2018) a noté que peu d'élèves étaient capables de prendre en compte le retrait d'une substance dans l'équilibre chimique, se fiant strictement à la comparaison du quotient réactionnel et de la constante d'équilibre chimique.

À l'inverse, les élèves qui démontrent une bonne compréhension des concepts sont capables de répondre à des questions qualitatives complexes et de choisir des démarches plus courtes en fonction des problèmes posés (BouJaoude et Barakat, 2003). Ainsi, dans une comparaison des performances d'élèves qui donnaient certaines explications à des problèmes conceptuels et ceux qui n'en donnaient pas ou se référaient à des explications erronées, Salta et Tzougraki (2011) ont constaté que les élèves qui performaient bien dans les problèmes conceptuels performaient mieux dans les problèmes algorithmiques. La recherche indique donc une relation entre un manque de compréhension des savoirs conceptuels et les difficultés face aux problèmes complexes et conceptuels et mathématiques, puisque les problèmes algorithmiques sont mieux résolus par les élèves avec une grande compréhension conceptuelle (BouJaoude et Barakat, 2003; Salta et Tzougraki, 2011).

Toutefois, les programmes scolaires sont davantage centrés sur la résolution de problèmes algorithmiques que l'enseignement des concepts (BouJaoude et Barakat, 2003; Salta et Tzougraki, 2011). Ainsi, dans une étude comparative des performances d'élèves grecs de 9^{e} année et de 11^{e} année en résolution de problèmes stœchiométriques, les élèves de 9^{e} année réussissaient mieux les

problèmes conceptuels alors que les élèves de 11e année réussissaient mieux les problèmes algorithmiques (Salta et Tzougraki, 2011). Par contre, même en 9e année, plus d'élèves réussissaient les problèmes algorithmiques que les problèmes conceptuels (Salta et Tzougraki, 2011). Ces résultats mettent en lumière que le système d'éducation grec favorise la maîtrise des algorithmes au détriment de la compréhension des concepts (Salta et Tzougraki, 2011). L'analyse de Canac et Kermen (2018) de la performance des élèves français du collège et du lycée pour l'interprétation de la formule chimique a démontré des résultats semblables, les élèves de terminale performant mieux aux questions qui n'impliquaient pas les questions de proportions.

En bref, l'apprentissage de la stœchiométrie implique le double défi d'harmoniser un modèle conceptuel abstrait à des substances physiques et des phénomènes concrets, puis de relier ces phénomènes à un modèle mathématique efficace, étant donné que la seule maîtrise de l'un de ses aspects n'est pas garante de la compréhension de l'autre (Johnstone, 1993; Salta et Tzougraki, 2011, p. 589; Taber, 2013). Ce défi semble être mieux réussi par les élèves qui comprennent les concepts que ceux qui maîtrisent les algorithmes, alors que les programmes sont axés sur la résolution des problèmes algorithmiques plutôt que l'enseignement des concepts (BouJaoude et Barakat, 2003; Canac et Kermen, 2018; Laugier et Dumon, 2004; Salta et Tzougraki, 2011). La compréhension de la stœchiométrie est donc davantage associée à l'interprétation des concepts qu'à l'application des équations (BouJaoude et Barakat, 2003; Laugier et Dumon, 2004). L'apprentissage des concepts de chimie et de stœchiométrie est également jonché d'obstacles pour les élèves, puisque les élèves rencontrent de nombreuses difficultés dans l'interprétation du langage chimique (Canac et Kermen, 2018; Dehon et Snauwaert, 2015; Laugier et Dumon, 2004).

Selon Johnstone (1993), ce langage a été développé de façon à mettre en relation des concepts de l'échelle microscopique, d'observations à l'échelle macroscopique, en une représentation symbolique qui mette en évidence les liens entre les concepts et un phénomène, ce qui forme le triplet chimique ou triangle de Johnstone[1][2] (Johnstone, 1993; Taber, 2013). Du fait de cette nature relationnelle, les obstacles rencontrés par les élèves dans l'apprentissage de ce langage éclairent à la fois les confusions ayant trait aux concepts de la chimie et leurs façons de structurer leurs raisonnements (Canac et Kermen, 2018). C'est pourquoi la prochaine section traite de ce sujet.

2.2 Le langage chimique, des chiffres et des lettres sans mots

Taber (2013) énonce le rôle du langage pour l'apprentissage de la chimie en se référant au triangle de Johnstone :

> L'importance du registre symbolique est liée à la représentation et la communication (Taber, 2009a). Les concepts de chimie - qu'ils relèvent du registre macroscopique, comme les « solutions », les « éléments », les « réactions réversibles », ou du registre microscopique, comme les « électrons », les

[1] Kermen et Méheut (cités dans Canac et Kermen, 2018) ont rajouté un registre empirique à ce modèle, le renommant « tétraèdre chimique ». Toutefois, beaucoup de travaux consultés font référence au triangle de Johntsone et la différence n'est pas suffisante pour dénaturer l'essence des propos des auteurs ni celle de ce travail.

[2] À titre d'exemple, la formule (symbolique) $pH = \log_{10}[H^+]$ fait le lien entre la concentration (concept macroscopique) et l'ionisation d'un acide (concept microscopique).

> « orbitales », les « ions de cuivre hydratés » - doivent être représentés, à la fois pour en faciliter la pensée et les opérations sur ceux-ci par l'individu, et pour communiquer avec les autres. Ceci implique en partie un vocabulaire technique qui doit être utilisé avec le langage naturel (comme l'anglais) pour imager le concept pour le sujet. […] Apprendre la chimie implique simultanément de former des concepts qui sont suffisamment alignés avec ceux des membres de la communauté chimique et d'adopter leurs systèmes de symboles utilisés couramment afin d'être capable de communiquer avec d'autres sur ces concepts. (p. 159)

Cependant, l'appréhension de ce langage est un apprentissage en soi, ce qui rend l'aspect simultané de l'apprentissage conceptuel et représentationnel complexe pour les débutants. Un premier obstacle dans la compréhension du langage chimique vient de sa polyvalence : un même symbole ou modèle peut être utilisé pour représenter différents niveaux de concepts, ce qui peut entraîner une confusion sur l'utilité de ce dernier et rendre les élèves perplexes quant à son interprétation (Taber, 2013). Face à cette confusion devant ce que signifient les symboles et les concepts, les élèves vont attribuer une signification de préférence à un registre, ce qui empêche de relier les concepts et symboles aux autres registres (Dehon et Snauwaert, 2015). Par exemple, Dehon et Snauwaert (2015) ont constaté qu'une majorité d'élèves définissaient l'identité des molécules par leur formule moléculaire, sans référence aux substances et à leurs propriétés. Les conceptions alternatives de la mole sont un autre exemple de signification préférentielle, certains élèves et enseignants l'associant à un nombre d'entités, d'autres à une masse, mais très peu à un ratio permettant de faire le pont entre les deux (Fang et al., 2014, p. 352). La confusion entre la signification de la masse atomique et de masse molaire procède du même obstacle : les élèves

comprennent mal pourquoi deux mesures ayant la même valeur, d'autant plus que l'une sert à calculer l'autre, proviennent de deux concepts différents (Fang et al., 2014, p. 353).

Par ailleurs, les élèves ont également une faible maîtrise de la syntaxe du langage chimique, qui régit les règles pour combiner les symboles et représenter un phénomène. Laugier et Dumon (2004) ont mis en lumière que les élèves français comprennent mal le principe de conservation des atomes, n'associant pas la conservation de la nature des atomes dans une transformation chimique à la conservation du nombre d'atomes, ainsi qu'une application mécanique de l'équilibration des équations de réactions, sans référence aux concepts ou phénomènes chimiques. Ces auteurs attribuent ces difficultés à la structure du programme français, qui présente les équations chimiques, et ce par une approche mathématique, avant les concepts qui permettent de les concevoir (Laugier et Dumon, 2004). Ces résultats sont cohérents avec ceux de BouJaoude et Barakat (2003), qui constataient que l'utilisation de stratégies algorithmiques de résolution de problème n'était pas associée à une compréhension des savoirs conceptuels alors que la résolution d'un problème complexe était tributaire de l'adéquation entre les savoirs procéduraux et les savoirs conceptuels des élèves (p. 2), soit la mise en relation des savoirs conceptuels et des variables impliquées dans les calculs. Ainsi, en présentant les procédures sans la signification des concepts représentés, les programmes d'éducation scientifique provoquent une déconnexion entre les équations, les phénomènes et les concepts chimiques (BouJaoude et Barakat, 2003; Canac et Kermen, 2018; Dehon et Snauwaert, 2015; Laugier et Dumon, 2004).

La combinaison de la confusion de la signification des concepts et de l'incompréhension conséquente se confirme dans l'interprétation des formules chimiques. Taskin et Bernholt (2014)

ont relevé que les élèves voient les formules brutes comme des abréviations, ou leur accordent d'autres interprétations, par exemple CH_2O comme étant une molécule de carbone liée à l'eau, SiO_2 l'équivalent de Si_2O_4 (cité dans Canac et Kermen, 2018, p. 176). Canac et Kermen (2018) ont lié cette difficulté à une confusion entre les concepts de corps simples et corps purs, une absence de maîtrise du concept de molécules et une vision arithmétique de l'élaboration des formules brutes. Cette vision arithmétique et cette confusion conceptuelle exposent que les élèves n'associent pas à des formules chimiques des caractéristiques distinctes les unes des autres, ce qui met en évidence une déconnexion entre la signification des concepts et celle des symboles utilisés (Canac et Kermen, 2018).

Enfin, le langage courant peut s'avérer un facteur limitant l'intelligibilité de concepts : Tyson et al. (1999) ont mis en lumière que le mot équilibre est vu par plusieurs élèves comme étant l'égalité entre les espèces chimiques et qu'un système fermé[3] malgré l'absence de fermeture physique est contre-intuitif. De plus, le terme « déplacement d'équilibre » entraînait beaucoup de confusion, certains l'associant à un changement de la constante d'équilibre, d'autres de la vitesse de réaction (relative ou directionnelle) et à la durée de la réaction (Tyson et al., 1999). Ces exemples exposent une confusion entre les définitions courantes et scientifiques des termes utilisés (Canac et Kermen, 2018; Dehon et Snauwaert, 2015; Tyson et al., 1999). Cette confusion dévoile que les enseignants explicitent peu les liens entre le registre symbolique et les concepts représentés,

[3] Un système fermé est un environnement qui permet des échanges d'énergie, mais pas d'échanges de matière. Tout contenant dans lequel a lieu une réaction entre deux liquides ou un liquide et un solide peut être défini comme un système fermé si la réaction n'implique pas une production de gaz.

ce qui entraîne certains élèves à donner eux-mêmes une signification à ces symboles (Canac et Kermen, 2018; Dehon et Snauwaert, 2015; Taber, 2013).

En bref, si le langage chimique permet aux chimistes de simplifier la circulation entre les concepts, les théories et les observations empiriques, il représente un grand obstacle à ceux qui n'ont pas des représentations qui donnent un sens à ce langage (Canac et Kermen, 2018; Dehon et Snauwaert, 2015; Johnstone, 1993; Laugier et Dumon, 2004; Taber, 2013). Ce constat met en évidence que bien que le langage chimique soit un registre de concept distinct des autres registres du triplet chimique, sa compréhension n'est pas indépendante de celle des savoirs conceptuels qui le sous-tendent (Canac et Kermen, 2018; Johnstone, 1993; Laugier et Dumon, 2004; Taber, 2013). De ce fait, la centration des enseignants sur la résolution d'équations tend à développer chez les élèves une compréhension superficielle à la fois des concepts, des phénomènes et du langage chimiques (BouJaoude et Barakat, 2003; Dehon et Snauwaert, 2015). Les conséquences de cette compréhension superficielle s'étendent sur l'interprétation de faits empiriques, ce qui formera le sujet de la prochaine section.

3. LES DÉMARCHES D'ENSEIGNEMENT DE LA STOECHIOMÉTRIE : UN DÉFICIT DANS LA PRISE EN CHARGE DES COMPOSANTES DIDACTIQUES

Dans leurs explications des obstacles rencontrés par les élèves dans l'apprentissage de la signification d'une équation chimique, Laugier et Dumon (2004) exposent comment les caractères construit et idéel des concepts et des modèles utilisés en chimie représentent un obstacle dans la compréhension des phénomènes :

> Pour comprendre la signification de l'équation de réaction, l'élève doit être en mesure de circuler entre la situation expérimentale observée (le registre des phénomènes sensibles, au niveau macroscopique : ce qui peut être vu, touché, senti) et le domaine des modèles ou le comportement des substances est interprété en termes de choses non visibles et moléculaires (le registre microscopique : atomes molécules, ions, structures) ; et traduit sous forme de notations et d'équations (le registre des représentations symboliques : éléments, formules, équation, mole, etc.) (Larcher, 1994; Johnstone, 2000). Mais l'élève ne peut se construire une représentation des objets du modèle à partir de sa connaissance des objets du monde sensible : une molécule d'eau n'est pas une infime partie d'une goutte d'eau. Il en résulte que beaucoup de concepts chimiques ne peuvent être appris de manière logique, du moins pas en terme (sic) de conséquence claire déduite d'une idée initiale acceptée et/ou d'interprétation d'une évidence empirique (Taber, 2001). En chimie, il n'existe pas de réaction chimique prototypique dans laquelle « le modèle affleure presque l'expérience ». (p. 63)

Cette dissociation entre le modèle ou la théorie qui explique un phénomène et l'information accessible à partir de ce phénomène illustre l'abstraction nécessaire pour donner un sens aux concepts chimiques, qui eux donnent sens aux phénomènes empiriques (Canac et Kermen, 2018; Johnstone, 1993; Kermen, 2018; Laugier et Dumon, 2004; Taber, 2013). En conséquence, pour apprendre à interpréter un phénomène, il faudrait maîtriser des concepts qui lui donnent sens ou tenter de traduire le phénomène en concepts pour l'expliquer, ce qui implique de se le représenter (Astolfi et Peterfalvi, 1993; Dukerich, 2015; Johnstone, 1993; Laugier et Dumon, 2004).

Or, Haigh et al. (2012) ont exposé que les élèves ne se représentent pas les concepts impliqués dans les expériences illustratives, c'est-à-dire les activités de laboratoire utilisées pour démontrer un phénomène ou appliquer des concepts enseignés. Ces laboratoires sont fréquemment utilisés dans l'enseignement de la chimie. Dans le cadre d'une série de recherches sur l'effet des expériences illustratives sur la compréhension des phénomènes d'oxydoréduction, Haigh et al. (2012) ont constaté que les élèves avaient beaucoup de difficultés à établir des liens entre leurs observations et les concepts liés aux particules (Haigh et al., 2012, p. 976). Par exemple, des élèves se sont révélés confus sur les observations à faire, les entraînant à observer la transformation d'un seul réactif ou à expliquer l'oxydation en se référant à la formation de rouille plutôt qu'à la théorie enseignée préalablement (Haigh et al., 2012). Ceci expose que les laboratoires traditionnels, où l'élève doit appliquer une démarche dictée, dépendent de la compréhension préalable des concepts plutôt que de favoriser cette appropriation par l'abstraction à partir des résultats (Dukerich, 2015; Haigh et al., 2012).

D'autres difficultés qui ont émergé de cette recherche étaient liées à l'interprétation des résultats, comme l'attribution d'un changement à la réaction inverse, l'interprétation du transfert d'électrons par une seule réaction plutôt que par un couple d'oxydation et de réduction et des interprétations de réactions impliquant des molécules plutôt que les ions dans la solution (ex. : oxydation du sulfate de cuivre et relâchement d'oxygène) (Haigh et al., 2012). De ces résultats, les auteurs ont conclu que les élèves avaient appris de façon superficielle la définition des réactions de réduction et d'oxydation et/ou se retrouvaient confus devant les multiples définitions qu'ils avaient rencontrées pour celles-ci, en plus de l'incompréhension des concepts déjà mentionnée (Haigh et al., 2012, p. 977). On peut relier cette confusion à l'attribution d'une signification

préférentielle, ce qui aurait pour conséquence de limiter la représentation du phénomène à la définition retenue par l'élève (Dehon et Snauwaert, 2015). La confusion dans la représentation du phénomène ne peut donc pas être réduite par les expériences où on demande à l'élève de reconnaître les concepts, puisque ceux-ci ne sont pas directement mis en évidence dans l'expérience (Laugier et Dumon, 2004).

Ces résultats mettent aussi en lumière la tendance des élèves à se représenter les phénomènes par des relations causales directes entre deux entités, donc réduites à une réaction, plutôt qu'en système complet, qui implique un donneur (réducteur), un receveur (oxydant) et des indifférents (ions spectateurs) (Ballini, Robardet et Rolando, 1997; Chi, 2005). Des difficultés semblables ont été observées dans des recherches sur la structuration des concepts en physique. Rozier (1988) avait relevé que des étudiants à l'université voyaient la chaleur comme unique cause de changement de température, voyaient l'énergie davantage comme une possession d'un système qu'un processus d'échange et confondaient l'idée d'énergie interne et de transfert d'énergie (cité dans Ballini et al., 1997, p. 82). Ballini et al. (1997) ont lié ces conceptions à une épistémologie naturaliste, qui voit la connaissance comme étant le résultat d'une induction à partir de la perception sensible, donc s'appuyant beaucoup sur l'intuition sensible[4]. Cette vision de la connaissance est reliée à la vision de la causalité comme une relation à sens unique entre deux entités, qui explique également la difficulté des élèves à se représenter un phénomène sous forme de système holistique (Ballini et al., 1997; chi, 2005; Chi et al., 2012; Vosniadou, 2013). Toutefois,

[4] La présence de cette posture épistémologique en chimie sera démontrée dans les sections 1.3 et 1.4.

ni l'induction ni l'expérience sensible en soi ne permettent de se représenter les modèles et les concepts abstraits de façon cohérente, puisqu'elles n'exposent pas le sens du concept ni l'incohérence des raisonnements des élèves sur le plan théorique (Ballini et al., 1997; chi, 2005; Chi et al., 2012; Dukerich, 2015; Haigh et al., 2012; Johnstone, 1993; Laugier et Dumon, 2004; Taber, 2013). Il y a donc des différences épistémologiques et ontologiques fondamentales entre la structure de raisonnement des élèves et celle à la base des représentations scientifiques (Ballini et al., 1997; Chi et al., 2012; Dukerich, 2015; Grosslight et al., 1991; Haigh et al., 2012; Laugier et Dumon, 2004; Taber, 2013). Ces différences ont des répercussions sur la façon de se représenter les événements, qui font en sorte que les élèves interprètent les laboratoires différemment des scientifiques (Chi et al., 2012; Dukerich, 2015; Grosslight et al., 1991; Vosniadou, 2013). Ces différences seront abordées dans la prochaine section.

3.1 L'utilité des modèles pour structurer les représentations

Les scientifiques ne formulent pas des modèles sans raison : ils servent à étudier les phénomènes (Martinand, 2002). Ainsi, Martinand (2002) définit les modèles comme des élaborations représentatives qui font le lien entre le référent empirique (phénomène observable) et la matrice cognitive, soit les ressources théoriques et les paradigmes épistémiques qui sont utilisés pour expliquer le phénomène. Par exemple, la mole est un modèle qui fait le pont entre le phénomène de la masse et l'idée d'atomes, ce qui permet d'expliquer pourquoi une masse égale de produits différents ne réagit pas à la même quantité de bases, puisque ces masses ne possèdent pas la même quantité de matière. Par la représentation du phénomène et des théories, le modèle donne prise à l'exploration et la manipulation des référents empiriques et théoriques, les premiers

en formulant des abstractions théoriques à partir du phénomène, les seconds en prédisant les conséquences d'une théorie sur un phénomène (Martinand, 2002).

Ce modèle est cohérent avec les constats de Grosslight et al. (1991). Dans une recherche comparant les idées de scientifiques et d'élèves sur les modèles, ces chercheurs ont constaté que les scientifiques voient les modèles comme un support pour comprendre les phénomènes, ce qui permet d'éprouver et de confronter cette compréhension à la réalité (Grosslight et al., 1991, p. 815). De plus, les scientifiques conçoivent la création de modèles en référence à sa fonction, qu'il s'agisse de comprendre la structure, la fonction, ou encore la communication d'un sujet (p. 815). Le modèle est donc une abstraction qui donne un sens à des réalités empiriques, ou à certaines de leurs parties (Coll et Treagust, 2001; Grosslight et al., 1991; Roy et Hasni, 2014). Ces abstractions peuvent être conditionnelles et modifiables en fonction de la partie de la réalité à expliquer (Coll et Treagust, 2001; Grosslight et al., 1991; Roy et Hasni, 2014). Cette distinction entre la réalité et le modèle est particulièrement importante en chimie, car elle est intimement liée à la démarche du chimiste, par la mise en relation de concepts et de données à des échelles macroscopiques et microscopiques à travers un registre symbolique (Harrison et Treagust, 1996; Johnstone, 1993; Taber, 2013). Les élèves, par contre, peuvent avoir une vision très différente des modèles : pour certains élèves, les modèles sont des répliques, exactes ou partielles, de la réalité, et de facto leur création est ancrée dans sa correspondance à la réalité (Grosslight et al., 1991). Une étude de Chittleborough, Treagust, Mamiala et Mocerino (2005) amène à nuancer la proportion d'élèves qui auraient cette conception. Dans leur étude, environ le tiers des élèves du secondaire de cette étude concevaient les modèles comme une représentation exacte de la réalité, alors qu'ils représentaient la majorité de l'échantillon de Grosslight et al. (Chittleborough et al., 2005;

Grosslight et al., 1991). Pourtant, Roy et Hasni (2014) ont repéré ces conceptions dans leur recherche sur la représentation des modèles chez des enseignants de sciences et technologies au Québec, ce qui insinue que l'enseignement des sciences est teinté par cette vision des modèles.

Dans ces conditions, un modèle peut difficilement se rattacher à un concept abstrait, puisqu'il n'y a pas de distinction entre la réalité et l'idée, pourtant nécessaire à l'abstraction des concepts scientifiques (Grosslight et al., 1991; Harrison et Treagust, 1996). Dans ces conditions, les concepts abstraits ne peuvent pas être transposés dans une situation concrète. Les difficultés dans l'interprétation du langage chimique peuvent être reliées à cet obstacle, puisque la distinction entre le registre empirique et conceptuel dans laquelle s'ancre ce langage est incompatible avec la vision de modèles des élèves (Canac et Kermen, 2018; Johnstone, 1993; Laugier et Dumon, 2004; Taber, 2013).

D'autre part, cette perception de nécessaire correspondance entre un modèle et la réalité explique les difficultés des élèves à interpréter les phénomènes visibles à partir des théories scientifiques. La correspondance entre observation et modèle est cohérente avec l'épistémologie naturaliste, en ce sens que la connaissance à acquérir est directement perceptible et applicable (Ballini et al., 1997). Dans cette conception, les liens entre les observations dans un laboratoire et les concepts liés aux particules deviennent très compliqués, puisque ces concepts ne sont pas nécessaires pour constater la transformation qui a lieu et qu'ils ne correspondent pas exactement à la réalité observée (Haigh et al., 2012). De même, cette conception lie également l'épistémologie naturaliste avec la causalité linéaire, qui est une explication plausible pour un modèle qui doit correspondre à la réalité, puisque le déclenchement d'un phénomène est perçu comme la

conséquence d'une seule action (Ballini et al., 1997; Chi et al., 2012; Watson et al., 1997). Cette différence de conception de la fonction et de l'élaboration des modèles a des conséquences concrètes sur leurs représentations de la matière et de leurs transformations. La prochaine section traite de ces conséquences.

3.2 Les modèles des élèves de la structure atomique

Dans le cadre d'une recherche sur les conceptions des liaisons chimiques, Coll et Treagust (2001) ont constaté que les modèles simples et réalistes, c'est-à-dire représentables avec une représentation qui apparaît concrète, sont préférés par les élèves et les chimistes, aux modèles abstraits, lesquels ne sont mobilisés que pour résoudre des problèmes auxquels un modèle simple est confronté (p. 376), ce qui concorde avec la conception de modèles répliquant réalité (Grosslight et al., 1991; Harrison et Treagust, 2001). En conséquence, les élèves ont tendance à lier les propriétés des modèles atomiques à celles des substances qu'elles observent, ce qui expose une indifférenciation entre les phénomènes microscopiques et leurs manifestations empiriques (Chi, 2005; Harrison et Treagust, 1996; Slotta, Chi et Joram, 1995; Taber, 2013). Cette indifférenciation se manifeste chez les élèves par une représentation des atomes comme des particules physiques et finies, accordant une matrice physique aux couches électroniques (p. 524), une texture (atomes durs ou mous) (p. 523), ou une forme sphérique (p. 523), visibles au microscope (p. 521).

Cette indifférenciation est cohérente avec la conception des propriétés de la matière comme étant une caractéristique plutôt que la conséquence d'un processus. Dans cette conception, appelée « conception matérialiste » (Chi, 2005; Slotta et al., 1995), les élèves ne font pas de différence entre les propriétés et les effets de l'énergie et celles de la matière (Chi, 2005; Slotta et al., 1995).

Par exemple, beaucoup d'élèves imaginent les liaisons chimiques des attaches physiques plutôt qu'un mouvement d'attraction entre particules chargées et se représentent la réaction chimique comme l'accumulation d'atomes plutôt qu'un échange (Boo et Watson, 2001). Cet obstacle est également visible dans la représentation de la chaleur (Yalçinkaya et al., 2009), du courant électrique et de la lumière, qui sont traités par les élèves de la même façon que les échanges de matières, selon une vision ou l'énergie peut être entreposée et transférée d'un réceptacle matériel à l'autre (Slotta et al., 1995).

La conception matérialiste explique également pourquoi les élèves ont de la difficulté à concevoir que les propriétés des substances observées, comme la couleur et la dureté, découlent de l'interaction des atomes, lesquelles découlent d'autres propriétés des atomes, comme l'électronégativité et le nombre d'électrons de valence (Taber, 2013). Ces conceptions sont incompatibles avec les représentations de ces concepts sous forme de processus et d'interactions holistiques, qui sont les conceptions scientifiques contemporaines, ce qui empêche les élèves de développer une conception adéquate des phénomènes liés à ces concepts (Boo et Watson, 2001; Chi, 2005; Harrison et Treagust, 1996, 2001; Slotta et al., 1995; Watson et al., 1997; Yalçinkaya et al., 2009).

Il faut noter que les réactions chimiques et les transformations chimiques peuvent être expliquées et comprises, jusqu'à un certain point, sans référence à la structure atomique (Cheng, 2018). Cheng (2018) a constaté que des élèves pouvaient expliquer les réactions chimiques en incluant les notions de collisions de particules, de ruptures et de formations de liaisons chimiques sans faire de distinction entre molécules, atomes ou particules (p. 236). Ceci ne devrait pas être

une surprise, puisque les explications des élèves interrogés sont très semblables au modèle de réaction chimique de Dalton (Laugier et Dumon, 2004). Toutefois, Wang et Barrow (2013) ont exposé que les étudiants universitaires qui comprenaient moins la structure des atomes et des molécules comprenaient également moins les concepts liés à la liaison chimique (p. 134). Ce constat expose que si le déroulement de la réaction chimique peut être compris indépendamment du niveau de compréhension de la structure atomique, la connaissance des modèles atomiques est importante pour établir les liens permettant de choisir et résoudre des problèmes plus avancés, comme l'explication des propriétés des substances à partir des liaisons chimiques ou l'influence de l'électronégativité dans l'établissement des liaisons chimiques, qui permettent d'expliquer la différence de comportement entre les acides forts et les acides faibles (Wang et Barrow, 2013). En conséquence, les conceptions alternatives de la structure atomique ont un impact sur la compréhension des mécanismes de réaction et la mise en relation des concepts de stœchiométrie entre eux, ce qui s'observe lorsqu'on demande aux élèves d'expliquer le déroulement d'une réaction ou les justifications des équations chimiques dans le cadre d'un système à l'équilibre (Cakmakci, 2010; Canac et Kermen, 2018; Harrison et Treagust, 2001). Ces conséquences sont détaillées dans la prochaine section.

3.3 Les obstacles des élèves face à l'équilibre chimique

Les obstacles rencontrés par les élèves dans l'apprentissage du langage chimique et de la réaction chimique convergent dans l'apprentissage de l'équilibre chimique, puisque ce phénomène est expliqué par deux champs théoriques et trois modèles (Négrier et Kermen, 2011, p. 167). Ainsi, dans une étude sur les démarches de calculs d'équilibre chimique, Kermen (2018) a noté que les

élèves avaient de la difficulté à distinguer les produits et les réactifs, n'associaient pas les significations des concepts aux symboles utilisés dans les équations et se centraient trop sur l'utilisation des formules pour comprendre l'effet du retrait d'une espèce chimique dans un système. Ces éléments mettent en évidence les confusions face au langage chimique et l'application de stratégies algorithmiques sans fondement conceptuel (BouJaoude et Barakat, 2003; Canac et Kermen, 2018; Négrier et Kermen, 2011).

Toutefois, certaines erreurs des élèves renseignent également sur les obstacles dus aux représentations des élèves. Dans leur mise à l'épreuve d'un instrument de mesure de la compréhension des concepts et des modèles d'équilibre chimique, Tyson et al. (1999) ont noté plusieurs obstacles à la compréhension des élèves. L'ajout de solide à un système en équilibre est particulièrement incompris, puisque certains élèves pensent qu'il ne perturbe jamais l'équilibre du système, alors que d'autres ne font pas la différence entre l'impact d'un solide et d'ions dissous sur cet équilibre (Tyson et al., 1999). Au-delà de l'application d'une stratégie algorithmique sans fondement conceptuel, ces interprétations catégoriques et contradictoires mettent en lumière la difficulté de lier la différence entre les propriétés des solides et des ions aux différences entre réactions (Kermen, 2018; Tyson et al., 1999). Cet obstacle se répercute aussi dans l'interprétation des interactions sans effet. Par exemple, l'eau est parfois vue comme un réactif ou un produit de la réaction plutôt que comme un solvant qui change la concentration des ions (Tyson et al., 1999).

Un autre exemple de cet obstacle est l'application du concept de saturation physique dans les systèmes chimiques : les élèves ont beaucoup de difficulté à expliquer pourquoi une réaction chimique peut transformer en ions les dépôts solides d'une solution saturée (Tyson et al., 1999).

Cette résistance s'explique en partie par la difficulté des élèves à faire la distinction entre l'équilibre chimique et l'équilibre physique, appris plus tôt dans les programmes, et la difficulté de se représenter les effets de rétroaction en raison d'une représentation basée sur la causalité linéaire (Ballini et al., 1997; Tyson et al., 1999).

Enfin, l'idée même d'équilibre chimique n'est pas si bien comprise, puisque Kermen (2018) constate qu'« une large majorité d'élèves n'utilise pas le critère d'évolution [thermodynamique] pour justifier l'arrêt de l'évolution du système » (p. 74) et qu'aucun élève interrogé n'avait fait référence à la théorie des collisions pour expliquer l'arrêt de l'évolution du système (p. 74). Paradoxalement, plusieurs élèves se sont référés au modèle des vitesses équivalentes de réactions directe et inverse, alors que ce modèle ne figure pas dans le programme français (Kermen, 2018, p. 74). En fait, la plupart des élèves voient l'arrêt de l'évolution du système comme l'arrêt d'une réaction, appliquant le modèle de la transformation totale et du réactif limitant au contexte de transformation non totale (Kermen, 2018, p. 75). Cette absence de distinction entre les transformations totales et non totales peut être liée à la recherche d'une causalité linéaire, puisque l'effet de rétroaction de la réaction inverse n'est pas vu comme une justification de l'arrêt de la transformation (Ballini et al., 1997). Watson et al. (1997) avaient observé que l'application de la causalité linéaire générait des conceptions alternatives quant aux rôles et aux causes de la flamme dans la combustion. Ce constat renforce l'idée d'une incompréhension de l'aspect holistique des transformations chimiques non totales, aspect qui nécessite d'être mis en évidence par les aspects relationnels d'un modèle (Chi et al., 2012; Kermen, 2018; Watson et al., 1997). D'autre part, cette incompréhension met en lumière la difficulté de lier

les propriétés des espèces chimiques aux différences dans leurs interactions, ce qui expose l'impact des conceptions de la structure atomique sur la représentation des réactions chimiques.

4. LA MODÉLISATION : ANGLE D'APPROCHE DE NOTRE RECHERCHE

L'ensemble des difficultés recensées illustre la difficulté des élèves à élaborer et analyser des représentations symboliques ou abstraites à partir de la réalité concrète. Cette activité est le cœur de la modélisation, qui selon Martinand (2002), est au centre de l'activité scientifique. C'est par la modélisation que l'activité scientifique établit des relations entre les observations empiriques et les théories qui guident le fonctionnement et l'explication des phénomènes ou objets scientifiques (Martinand, 2002). Les modèles ayant la double fonction de réduction opératoire de concepts théoriques et d'abstraction des objets et des phénomènes scientifiques, la tâche de modélisation est essentielle pour élaborer et mettre à l'épreuve les représentations des phénomènes scientifiques (Martinand, 2002).

Toutefois, la modélisation n'est pas compatible avec une démarche de démonstration, puisque cette démarche n'entraîne pas une prise en charge par l'élève de la représentation des objets et des phénomènes (Martinand, 2002). Ce faisant, la présentation de modèles scientifiques imposés aux élèves entraîne un enseignement dogmatique, sans tâche de représentation et sans relation avec les observations empiriques, qui échoue à lier les concepts théoriques à leurs connaissances du monde empirique (Canac et Kermen, 2018; Lemeignan et Weil-Barais, 1992; Martinand, 2002). Les constats de Laugier et Dumon (2004) vont en ce sens, exposant que la centration de l'enseignement des équations en France entraîne une incompréhension des phénomènes représentés, alors que Canac et Kermen (2018) soulignent que les élèves ne se

représentent pas les objets symbolisés dans le langage chimique. Les résultats de Haigh et al. (2012) vont dans le même sens, puisque les expériences illustratives (nécessairement ancrées dans une visée de démonstration) n'entraînent pas les élèves à conceptualiser les phénomènes scientifiques, mais à les rattacher à leurs connaissances antérieures.

Un problème similaire est présent dans l'utilisation de modèles matériels. Au Québec, Roy et Hasni (2014) ont constaté que les enseignants interrogés considéraient l'objectif de la modélisation comme la démonstration (p. 365). Cette idée est cohérente avec leurs représentations des modèles associées aux maquettes physiques (ex. : maquettes d'organes, maquettes de la double hélice d'ADN) plutôt qu'aux équations mathématiques. De facto, les fonctions heuristiques de la modélisation, bien que mentionnées par quelques enseignants, ne sont pas vues comme le centre de la démarche de modélisation. Les modèles sont vus comme des réalités invisibles, mais peu discutables, qui doivent être comprises et appropriées (Roy et Hasni, 2014). Orange Ravachol (2016) fait un constat similaire dans l'enseignement de la biologie et de l'écologie en France, où les modèles physiques sont surtout utilisés pour confirmer des hypothèses plutôt que pour les élaborer. Ainsi, alors que la géologie développe des modèles géologiques de plus en plus complexes au fur et à mesure de leurs évolutions, la modélisation à l'aide de maquettes centre l'élève sur la simplification des événements physiques (Orange Ravachol, 2016). De plus, dans les deux cas, les modèles sont utilisés pour penser l'aspect empirique plutôt que de mettre en relation la théorie et les événements observés (Orange Ravachol, 2016; Roy et Hasni, 2014).

Un problème similaire est noté également avec les simulations informatiques. Les simulations informatiques sont des logiciels développés pour faciliter la représentation des

phénomènes, par exemple, en traçant directement les graphiques de vitesse à partir du déplacement d'un objet (Beaufils, 2009). Alors qu'on s'attendait à ce que ces outils de représentation permettent aux élèves lier plus facilement les modèles théoriques aux observations empiriques, les élèves s'en sont retrouvés plus confus, puisqu'ils ne distinguaient pas ce qui relève de la théorie et ce qui relève de l'observation empirique (Beaufils, 2009). Ainsi, alors que les scientifiques distinguent bien la différence des calculs à partir des modèles et les mesures à partir d'instruments, les élèves associaient tous ces aspects à la simulation informatique, exposant que le simulateur était, pour les élèves, une réalité indépendante à étudier plutôt qu'une transposition ou une traduction d'un phénomène dans la réalité (Beaufils, 2009). Les simulations informatiques, qui simulent ou représentent des modèles théoriques, n'ont donc pas amené les élèves à modéliser, puisqu'ils n'établissaient pas de relation entre le modèle simulé et le phénomène qui devait y être lié.

Ces différentes recherches mettent en lumière que les outils de démonstration ne peuvent qu'être un complément à une démarche de mise en relation entre l'observation de phénomènes, de modèles et de théories. De plus, ces recherches exposent certaines contraintes épistémologiques de l'enseignement des sciences : sans la mise en évidence du sens du concept scientifique, aucune démonstration ne peut être liée à une observation empirique (Beaufils, 2009; Orange, 2005); toutefois, ce sens naît d'une certaine correspondance avec le référent empirique; enfin, l'élève doit prendre en charge l'élaboration du modèle, sans quoi il n'établira des relations qu'avec le référent empirique ou théorique (Haigh et al., 2012; Kermen, 2018). Ce travail de mise en relation nécessite toutefois des changements dans la posture épistémologique de l'élève (Astolfi et Peterfalvi, 1993; Kermen, 2018).

Ce constat met en évidence une seconde impasse : celle des ressources des enseignants pour guider les élèves dans la démarche de modélisation. En effet, si les chimistes peuvent se servir de laboratoires pour modéliser, cela représente un défi beaucoup plus grand pour les élèves, dont la conception matérialiste des phénomènes chimiques fait obstacle à la différenciation entre les deux référents (Chi, 2005; Haigh et al., 2012). La seule argumentation n'est pas non plus une option, puisque cela reviendrait à utiliser une logique démonstrative sans ancrage dans le référent empirique (Astolfi et Peterfalvi, 1993; Ballini et al., 1997). Face à cette impasse, on peut se demander si certaines technologies numériques peuvent faciliter la mise en relation des deux référents pour les élèves.

5. LES TECHNOLOGIES IMMERSIVES DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE : UNE VOIE PROMETTEUSE POUR FAVORISER LA MODÉLISATION

Cette section expose les technologies disponibles pour assister les enseignants et les élèves dans l'apprentissage de la chimie. Les avantages, les limites et les relations entre la technologie et le processus d'apprentissage sont décrits pour chacune, avec une emphase particulière pour les technologies immersives. Cette présentation nous permettra de situer notre choix des technologies immersives.

5.1 Les technologies utilisées dans l'enseignement de la chimie

L'accès aux technologies immersives s'améliore rapidement depuis quelques années, mais ces technologies sont encore largement inaccessibles pour beaucoup de classes (Kavanagh et al., 2017; Nesenbergs et al., 2021). De facto, pour comprendre le potentiel et les enjeux des

technologies immersives, il faut s'attarder aux technologies non immersives aussi. Une étude au Kentucky a montré que des enseignants utilisent encore ces technologies (en particulier les tutoriels) (Elswick et Lennex, 2017). Cette étude affirme également que les vidéos et les animations sont encore utilisées par les enseignants de sciences pour démontrer des phénomènes (Elswick et Lennex, 2017). Nous nous attarderons donc aux logiciels, aux animations, aux logiciels d'expérimentation assistée par ordinateur (EXAO) et aux simulateurs.

5.1.1 Les logiciels

Selon Cox (2012), les principes pédagogiques qui guident le développement des logiciels d'enseignement-apprentissage des sciences ont peu évolué depuis les années 80, même si les logiciels contemporains sont souvent plus sophistiqués et performants. Ainsi, les logiciels comme les tutoriels, les simulations, les logiciels de modélisation et d'expérimentation assistée par ordinateur (EXAO) sont encore présents en classe ou en ligne (Cox, 2012).

Les tutoriels sont des programmes où à partir d'un problème, on pose des questions à l'apprenant, lequel doit répondre aux questions (Cox, 2012). Les réponses des apprenants peuvent ensuite être confirmées, infirmées ou questionnées, dans le cas de logiciels offrant une assistance pour guider les apprenants vers une réponse adéquate (Cox, 2012). Les tuteurs intelligents, présents dans nombre d'environnements informatiques et de didacticiels, représentent une version interactive de ce type de logiciel. Ce type de logiciel s'appuie donc sur le conditionnement opérant pour guider l'élève dans l'acquisition de connaissances ou l'évaluation de ses connaissances (Cox, 2012). De ce fait, les tutoriels ne permettent pas une exploration libre du problème soumis. De plus, comme les tutoriels fonctionnent par questions-réponses, leur bon fonctionnement dépend de

la compréhension préalable du langage utilisé et de l'accompagnement des apprenants dans l'analyse de leurs réponses (Cox, 2012).

Les logiciels de simulation sont des programmes qui offrent à l'élève de manipuler des phénomènes présentés de façon virtuelle (Cox, 2012; El Bilani, 2007). Dans ces logiciels, les élèves peuvent manipuler un certain nombre de variables et observer le résultat de ces manipulations sur le phénomène étudié, permettant un certain niveau d'enquête et de formulation d'hypothèse (El Bilani, 2007). La plateforme PhET (*PhET-chimie*, 2022) est un exemple moderne de ce genre de logiciel. Ces logiciels permettent donc de visualiser des relations entre différentes variables de même que les relations entre une variable et ses conséquences empiriques (Cox, 2012). Dans cette optique, la simulation permet de visualiser un phénomène et/ou un modèle théorique, contrairement aux tutoriels (Chomat et al., 1992; Cox, 2012). En présentant directement le modèle théorique, les simulations mettent en évidence la relation entre l'interprétation d'un phénomène et sa représentation théorique (Beaufils, 2009; Chomat et al., 1992). Cet apprentissage est très important en chimie, où plusieurs modèles peuvent être utilisés pour représenter le même objet et où chaque modèle peut receler des obstacles différents pour les élèves (Harrison et Treagust, 1996; Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006). Toutefois, pour qu'une personne apprenne à partir d'une simulation, elle doit être en mesure de transposer la représentation simulée en représentation de la réalité et en même temps distinguer les caractéristiques de chaque représentation (Beaufils, 2009; Le Maréchal Bécu-Robinault, 2006). Beaufils (2009) a mis en lumière que les élèves ne font pas tous cette relation ou cette distinction. De plus, même s'ils permettent une certaine exploration, les simulations demeurent des représentations préprogrammées dont les modifications sont limitées aux variables déjà incluses (Cox, 2012). En conséquence, nombre d'hypothèses des élèves ne

peuvent être explorées ou confrontées si elles ne sont pas déjà prévues dans le logiciel. La limitation des manipulations possibles fait également en sorte que les élèves ne peuvent pas nécessairement observer leurs propres représentations du phénomène (Cox, 2012).

Les logiciels de modélisation permettent aux élèves de bâtir à partir de leurs idées un modèle pour représenter une situation (Cox, 2012). À l'instar des simulations, les élèves peuvent étudier les relations entre différentes variables, visualiser les conséquences de la manipulation des variables sur le modèle et étudier ces hypothèses (Cox, 2012). Par contre, le logiciel de modélisation laisse l'élève expliciter ces idées pour élaborer une représentation personnelle de la situation étudiée. Le développement de ces représentations s'est avéré utile pour développer le raisonnement causal chez les élèves et comprendre tant les phénomènes scientifiques que les codes pour les représenter (Cox, 2012). Toutefois, ces représentations ne sont pas nécessairement contrôlées par un modèle réaliste, donc les élèves peuvent développer des représentations erronées d'un phénomène s'ils ne sont pas confrontés à une représentation plus exacte de la réalité ou d'une expérience réelle (Cox, 2012).

Cox (2012) notait que les simulations et les logiciels de modélisation sont moins présents dans les classes depuis la fin des années 2000. Elle reliait cette baisse d'utilisation à des facteurs institutionnels, comme les ressources allouées par les établissements d'enseignants, le support offert aux enseignants dans la familiarisation avec de nouvelles technologies et la pression des établissements pour l'utilisation de logiciels commerciaux non spécialisés (Cox, 2012). Toutefois, les recherches sur l'adoption des technologies numériques par les enseignants pointent également vers des facteurs personnels : les croyances sur la technologie, les connaissances sur leur utilisation

et la perception du rôle de l'enseignant influencent grandement leur propension à intégrer les technologies dans leurs classes (Ifinedo et Rikala, 2019; Morales, 2019). Les logiciels de modélisation et de simulation sont ancrés dans une perspective de découverte et de construction de connaissances par l'élève, ce qui représente une transformation du rôle de l'enseignant vers le guidage plutôt que la transmission de connaissances (Huang et al., 2022; Morales, 2019). Cette transformation du rôle nécessite un accompagnement des enseignants ainsi qu'un renouvellement des formations initiales et continues à l'enseignement (Cox, 2012; Ifinedo et Rikala, 2019). Enfin, l'apprentissage avec ces technologies nécessite le développement de connaissances sur l'utilisation de la technologie avant de pouvoir apprendre sur le contenu présenté (Cox, 2012); en conséquence, les activités avec ces technologies demandent plus de temps et de planification que les démonstrations ou les tutoriels.

5.1.2 Les animations

Les animations sont des séquences dynamiques d'images pour figurer un objet ou un phénomène (El Bilani, 2007). À l'instar des vidéos, les animations permettent de visualiser le déroulement de certains phénomènes, normalement invisible pour les élèves et trop implicite dans les images statiques (El Bilani, 2007). Par contre, les élèves ont peu de contrôle sur le contenu présenté : tout au plus, ils peuvent arrêter et reculer une partie de la séquence d'images. Ceci fait en sorte que les limites des tutoriels s'appliquent également aux animations, puisqu'en fin de compte, l'animation n'est pas un outil d'exploration du phénomène.

Si l'animation peut améliorer l'apprentissage d'un contenu, la qualité de l'apprentissage avec les animations dépend toutefois de nombreux facteurs, dont la quantité d'information

présentée, le niveau de langage utilisé (formel ou commun), l'aspect concret du contenu présenté et les questions, rétroactions et accompagnement offerts aux apprenants (Mayer, 2014). En particulier, il est connu que les élèves apprennent mieux avec les animations lorsque les contenus présentés de façon à relier le savoir inconnu au savoir déjà acquis de l'élève, en passant par des exemples concrets ou des analogies (Mayer, 2014). Ce principe représente un défi pour l'apprentissage de la chimie, où les représentations des élèves posent souvent obstacle à l'apprentissage et où l'enjeu est justement de se représenter des concepts abstraits. De plus, le langage chimique est une partie incontournable de l'apprentissage de la représentation des phénomènes chimiques (Canac et Kermen, 2018). La familiarisation avec le langage formel est donc jusqu'à un certain point nécessaire pour que les élèves apprennent les différences entre certains concepts et la manière de représenter les objets. Enfin, l'animation en soi n'est pas un outil de découverte pour les élèves, puisqu'elle ne permet pas une manipulation du contenu présenté. Elle peut donc servir de support ou comme objet d'analyse pour un enseignement magistral, mais son potentiel pour rendre les élèves conscients de leurs représentations ou pour explorer en profondeur un phénomène est limité.

5.1.3 Les expérimentations assistées par ordinateur (EXAO)

Les EXAO sont des logiciels qui permettent de recueillir, représenter et faciliter l'analyse des données recueillies à partir de capteurs dans une situation réelle (Riopel et al., 2006). Par exemple, à partir d'un vidéo, certains logiciels peuvent retracer le mouvement d'un objet et en calculer la vitesse, l'accélération ou le déplacement, puis la transposer dans une représentation graphique (Riopel et al., 2006). Cette transposition facilite l'interprétation des résultats par les

élèves et met en évidence les liens entre la situation et les représentations graphiques, offrant aux élèves l'occasion de faire le lien entre un modèle théorique et les situations pratiques, de façon analogue aux simulations (Riopel et al., 2006). De plus, les EXAO permettent de réduire ou même éviter le temps alloué aux calculs et à l'analyse des données après l'expérience, à l'instar d'une calculatrice ou d'un chiffrier informatique.

À la différence des simulations, les EXAO ne sont pas perçues comme indépendantes de la réalité, puisque leur fonctionnement est nécessairement lié à une expérience (Riopel et al., 2006). De plus, en tant qu'outil d'expérimentation, les EXAO ne contraignent pas la démarche de l'élève, ce qui fait en sorte que l'élève peut explorer ses propres hypothèses à partir de ses propres représentations, à l'instar des logiciels de modélisation (Riopel et al., 2006). Par contre, l'EXAO apporte par l'expérience une confrontation à la réalité que les logiciels de modélisation ne peuvent pas faire seuls.

Toutefois, pour que les élèves utilisent efficacement les EXAO, ils doivent en comprendre le fonctionnement, ce qui implique l'apprentissage de l'utilisation du logiciel. Ainsi, alors que les logiciels de simulations peuvent remplacer certaines activités de laboratoires, donc réduire la durée de certaines activités, les EXAO peuvent allonger les activités d'apprentissage, puisqu'ils doivent nécessairement être utilisés dans une expérience. De plus, comme pour les simulations, l'apprentissage par EXAO nécessite que l'élève comprenne suffisamment les représentations pour les relier à l'expérience et à des concepts (Cox, 2012; Riopel et al., 2006). Ce faisant, l'EXAO ajoute des contraintes aux expériences. Enfin, alors que les logiciels de modélisation permettent aux élèves d'expliciter leurs représentations et de manipuler des concepts, l'EXAO ne facilite pas

cette explicitation. Les enseignants doivent donc guider les élèves dans la prévision ou l'interprétation des résultats graphiques, à l'instar de ce qu'ils feraient avec une expérience sans assistance.

5.1.4 Les simulateurs

Les simulateurs sont des environnements gérés par des ordinateurs qui réagissent aux actions de l'utilisateur et qui placent l'apprenant face à une situation pratique à laquelle il participe (Björn et al., 2021; Silvennoinen et al., 2012). Cette situation peut être générée sur un écran ou intégrée à une reproduction d'un environnement réel, par exemple, le poste de commande d'un bateau (Sellberg, 2017; Silvennoinen et al., 2012). Un exemple de simulateur en chimie est le logiciel Microméga©, qui simule des expériences de titrages et d'estérification (Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006).

Le simulateur et la simulation sont similaires en ce que les actions des élèves ont des répercussions sur ce qui leur est représenté. Toutefois, alors que les simulations peuvent être utilisées pour explorer un phénomène de façon conceptuelle, le simulateur est conçu pour la reproduction des situations concrètes, comme le vol d'un avion ou une opération chirurgicale (Silvennoinen et al., 2012). Les simulateurs permettent aux apprenants de développer leurs compétences, d'apprendre des procédures et de se familiariser aux contextes professionnels dans un environnement sécuritaire, où les dommages possibles sur l'équipement sont limités et avec un temps de pratique infini (Björn et al., 2021; Sellberg, 2017). Ces situations mettent en lumière que les simulateurs, tout en ayant leurs propres contraintes liées à son utilisation et son intégration (besoin d'installations particulières, grande préparation, formation des personnes enseignantes,

période de familiarisation par les élèves, etc.), peuvent réduire certaines contraintes qui ont cours dans le monde réel. C'est par exemple l'idée derrière les simulateurs de vol, qui reproduisent dans des cadres sécuritaires des scénarios opérationnels qui ne le seraient pas dans la réalité (Aylward et al., 2021). Dans le cas de la chimie, le logiciel Micromégа© permet aux élèves de se concentrer sur la planification et l'analyse de l'expérience, en évitant les manipulations des instruments de laboratoire et en donnant rapidement les résultats de l'expérience sous forme graphique (Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006).

Comme le simulateur est basé sur des scénarios de situations pratiques, la fidélité de la situation et des réactions du simulateur est directement liée à la qualité de l'apprentissage des apprenants (Sellberg, 2017). En effet, dans un simulateur où les situations sont peu réalistes, les apprenants ont tendance à traiter la situation comme la simulation d'un modèle plutôt qu'une situation professionnelle (Sellberg, 2017). Ceci s'explique du fait que dans certains apprentissages, particulièrement ceux qui incluent l'utilisation d'outils techniques, la représentation de la situation passe également par la représentation gestuelle (Sellberg, 2017).

Toutefois, le réalisme d'une situation ne doit pas être confondu avec sa pertinence pédagogique, puisque certaines recherches en dentisterie avaient mis en lumière que les étudiants utilisant un simulateur ne comprenaient pas pourquoi leurs conduites étaient erronées dans certaines situations (Sellberg, 2017). Ainsi, une étude sur l'apprentissage de l'électroencéphalographie a exposé que les élèves avaient besoin à la fois de cours théoriques et d'explications sur le simulateur pour profiter de celui-ci (Björn et al., 2021). Ceci met en lumière que le simulateur, bien qu'utile pour relier théorie et pratique, ne met pas en évidence de soi-même

cette articulation (Björn et al., 2021). Dans le cas de la chimie, cette mise en relation est le centre de l'apprentissage, puisque la préparation de l'expérience, la réalisation et l'interprétation de l'expérience nécessitent une reconstruction à partir de concepts abstraits (Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006; Marzin-Janvier, 2013). Ceci est d'autant plus vrai que les outils d'analyse transmettent souvent des représentations graphiques ou des valeurs numériques qui doivent être utilisées pour déduire ce qui s'est passé plutôt qu'une représentation directe des phénomènes. Les simulateurs nécessitent donc un accompagnement pour que les apprenants ne voient pas les simulateurs comme le reflet exact de la réalité, mais une façon d'en appréhender une partie et un outil de réflexion (Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006). De plus, l'ancrage dans des scénarios pratiques limite l'exploration des phénomènes impliqués, puisque l'apprenant ne peut pas ou peu modifier les contraintes de sa situation, ni expliciter ses propres représentations, à l'instar des tutoriels et des animations.

5.2 Les technologies immersives : des développements technologiques qui compensent les limites humaines pour mieux appréhender la complexité des savoirs scientifiques

En parallèle aux logiciels et aux simulateurs se sont développés les environnements de réalité virtuelle, qui forment une famille appelée technologies immersives (TI). Une technologie est dite immersive lorsqu'elles donnent l'impression à son utilisateur d'être et d'interagir dans un environnement différent de l'environnement réel (Dalgarno et Lee, 2010). Ces technologies incluent les environnements de réalité virtuelle, de réalité augmentée et de réalité mixte. Les environnements de réalité virtuelle, appelés tout simplement réalité virtuelle (RV), sont des environnements entièrement projetés par un appareil électronique (comme un casque de réalité

virtuelle), avec lesquels des personnes peuvent interagir (Nesenbergs et al., 2021). On peut penser par exemple à Google Expeditions, une application de téléphone qui permet de visiter certains sites touristiques comme si l'individu était à l'endroit visité. D'autres technologies projettent des éléments virtuels sur un environnement réel, formant ce qu'on appelle une réalité augmentée (RA) (Dunleavy et Dede, 2014). Le jeu « Pokémon Go! » était une application ludique de réalité augmentée. Enfin, les technologies dites de réalité mixte (RM) permettent l'interaction simultanée avec des éléments réels et virtuels.

Selon Dalgarno et Lee (2010), le potentiel d'apprentissage de la réalité virtuelle provient de l'immersion, laquelle est tributaire des interactions de l'apprenant avec l'environnement et de la fidélité de l'environnement. Un environnement fidèle doit renvoyer à l'utilisateur une réaction cohérente premièrement avec l'action de l'utilisateur, ensuite avec la nature de l'objet ou de l'environnement simulé (Dalgarno et Lee, 2010). Lorsque les actions des élèves, les réactions de l'environnement et la qualité de son interface sont suffisamment grandes, l'élève perçoit l'environnement virtuel comme un lieu réel qu'il peut explorer (Dalgarno et Lee, 2010). Dès lors, cet environnement virtuel peut servir de médium pour se représenter un phénomène, pour l'explorer et le questionner, puis comme lieu ou objet d'interactions sociales avec d'autres (Fowler, 2015).

Bien que similaires aux simulateurs, les technologies immersives peuvent placer les apprenants dans des situations qui ne sont pas réalistes. Ainsi, alors que le simulateur doit reproduire clairement la réalité, les technologies immersives peuvent présenter une réalité modifiée pour faciliter l'étude d'un phénomène ou mettre en évidence un concept abstrait (Liou et

al., 2017). Par exemple, on peut faire voir aux élèves les processus qui ont cours dans les cellules ou leur faire traverser les vaisseaux sanguins comme s'ils faisaient partie des globules rouges (Klingenberg et al., 2020; Parong et Mayer, 2018). En conséquence, les technologies immersives peuvent ajouter ou présenter des informations qui ne seraient pas directement visibles dans la réalité, comme la vitesse d'un fluide, la quantité de radiation nucléaire ou une perspective extérieure à son point de vue (Chang et al., 2020; Dunleavy et Dede, 2014; Yoon et al., 2017). Les technologies immersives peuvent donc permettre des apprentissages combinant l'interactivité du simulateur et l'exploration conceptuelle de la simulation (Johnston et al., 2018; Liou et al., 2017). De ce fait, la réalité virtuelle et la réalité augmentée ouvrent la voie à des situations d'apprentissage impossibles tant avec du matériel physique qu'avec un logiciel seul. Parmi ces situations, on peut placer les élèves dans des environnements normalement inaccessibles (Poland et al., 2003), les plonger dans une enquête sur des enjeux socioscientifiques (Chang et al., 2020), montrer directement et simultanément une représentation théorique et une représentation empirique d'un phénomène (Yoon et al., 2017), ou simuler des phénomènes de façon beaucoup plus rapide (Kim et al., 2020; Marzin-Janvier, 2015). Ces perspectives sont très intéressantes pour l'enseignement de la chimie, puisque les technologies immersives ont le potentiel de lier les représentations abstraites des concepts théoriques et les représentations visibles des phénomènes.

6. LES TECHNOLOGIES IMMERSIVES : APPORT DES ÉCRITS SCIENTIFIQUES

Parmi les technologies présentées dans la dernière section, les technologies immersives sont à la fois les plus récentes, les plus interactives et les plus polyvalentes. La possibilité de projeter un environnement complet et de représenter des concepts abstraits autant que des

situations concrètes en font un outil très intéressant pour l'enseignement de la chimie. Cette section fait état des bénéfices et des limites spécifiques des technologies immersives pour l'enseignement de la chimie.

6.1.1 Avantages et bénéfices

À l'instar des simulateurs, les technologies immersives sont de très bons outils pour contextualiser les apprentissages (Dalgarno et Lee, 2010). Le contournement des contraintes physiques permet d'utiliser des contextes qui mettent davantage en évidence la relation entre le savoir et ses répercussions (Chang et al., 2013; Johnston et al., 2018; Poland et al., 2003). Ce faisant, les technologies immersives peuvent réduire la perception d'écart entre une théorie et un contexte pratique et par conséquent, l'écart entre les objectifs pédagogiques, les contraintes pédagogiques et les contraintes de la situation d'apprentissage (Chang et al., 2013; Fowler, 2015; Pande et al., 2021; Poland et al., 2003). Ce potentiel a été particulièrement mis en évidence dans les recherches sur la pédagogie d'enquête, qui ont conclu que les technologies immersives permettaient aux élèves de découvrir, d'interagir et de manipuler des concepts abstraits, facilitant la compréhension des concepts ancrés dans une expérience (Cai et al., 2021; Liou et al., 2017; Pedaste et al., 2020). De ce fait, les technologies immersives favorisent la participation active de l'élève à l'activité d'apprentissage, ce qui donne un sens aux activités qu'on leur propose et augmente leur engagement cognitif (Huang et al., 2022; Thornton et Lammi, 2021).

L'effet bénéfique des technologies immersives sur la motivation n'est pas étranger au caractère expérientiel et à l'immersion que procurent ces technologies (Akçayır et Akçayır, 2017; Thornton et Lammi, 2021; Zhao et al., 2020). En effet, plusieurs revues de littérature mettent en

évidence que les technologies immersives sont associées à une motivation accrue chez les élèves (Akçayır et Akçayır, 2017; Garzón et Acevedo, 2019; Wang-Kin, 2021). Le caractère motivant de ces technologies s'explique par leur caractère immersif, par le contrôle et la liberté accordés à l'élève, et par la stimulation de facteurs affectifs grâce aux situations qui leur sont proposées (Cai et al., 2021; Dalgarno et Lee, 2010; Huang et al., 2022; Zhao et al., 2020).

Un autre avantage des technologies immersives est l'amélioration des compétences de représentation spatiale (Dalgarno et Lee, 2010). La liberté, le contrôle et la fidélité des mouvements et des actions possibles dans les environnements immersifs rendent les interactions et la représentation spatiale beaucoup plus réalistes que les autres outils multimédias (Dalgarno et Lee, 2010). De ce fait, les environnements immersifs facilitent la visualisation des propriétés spatiales et donnent une forme concrète aux manipulations mentales des formes, de même que les concepts abstraits qui y sont liés (Arican et Özçakir, 2021; Gün et Atasoy, 2017). De nombreuses études sur l'apprentissage de la géométrie avec la réalité augmentée concluent que cette technologie entraîne de meilleures compétences de représentations spatiales, une meilleure compréhension conceptuelle des relations géométriques et de meilleures performances académiques en géométrie (Aldalalah et al., 2019; Arican et Özçakir, 2021; Omar et al., 2019; Suprapto et al., 2020; Topraklikoglu et Ozturk, 2021).

Cette facilitation de la visualisation affecte plus largement l'ensemble des apprentissages où un concept abstrait nécessite une représentation concrète. Dans une recherche sur l'apprentissage des principes de Bernoulli dans les musées, Yoon et al. (2017) ont constaté que la réalité augmentée facilitait la réflexion conceptuelle des apprenants sur les principes de physique,

en superposant des informations abstraites au phénomène observé. De même, Wang-Kin (2021) notait que la plupart des recherches sur l'utilisation des technologies dans l'enseignement de la chimie mettaient en valeur la visualisation des structures moléculaires comme moyen d'amélioration de la compréhension conceptuelle des élèves. Ainsi, la visualisation pourrait être un moyen de faciliter l'interprétation des observations empiriques à l'aune des concepts qui leur donnent sens. Dès lors, la réalité virtuelle présente un grand potentiel pour soutenir les élèves dans une démarche de modélisation.

6.1.2 Limites

Bien que les technologies immersives aient un potentiel qui reste à explorer, elles ne sont pas une panacée et leurs effets bénéfiques ne sont ni infinis ni garantis. En fait, certaines recherches insèrent un doute sur la portée des avantages qu'on leur attribue. C'est le cas de la motivation. Des recherches ont mesuré la motivation d'élèves qui utilisaient pour la première fois une technologie immersive pour une courte période, empêchant de discerner si l'augmentation de motivation est due à la technologie elle-même ou à l'effet de nouveauté, soit la curiosité due à l'émerveillement d'une première expérience (Akçayır et Akçayır, 2017). De ce fait, certains articles notent qu'une exposition prolongée ou une familiarité aux technologies immersives pourrait réduire voire annuler l'impact des technologies immersives sur la motivation, argument que confirment quelques résultats de recherches (Huang et al., 2022; Pande et al., 2021). Ainsi, l'impact des technologies immersives sur la motivation, bien qu'existant, pourrait ne pas être aussi important si elles venaient à faire partie du quotidien des élèves, d'autant plus si elles sont associées à une activité ou un contenu qui n'est pas motivant lui-même (Pande et al., 2021).

D'autre part, les technologies immersives s'accompagnent de contraintes techniques considérables, comme une bonne connexion au réseau sans-fil, le coût des appareils, l'accès à un soutien technique efficace, etc. (Cox, 2012; Pedaste et al., 2020). L'adaptation des ressources nécessite de grands investissements de la part des institutions scolaires (Cox, 2012; Lewis et al., 2021). De plus, les enseignants font face à des difficultés techniques qui peuvent alourdir et nuire au processus d'apprentissage des élèves (Akçayır et Akçayır, 2017). Cette situation expose que le potentiel des technologies immersives dépend également de la qualité de celles-ci, qualité qui se dépeint dans la qualité de l'interface, la clarté de la situation d'apprentissage, la cohérence du contenu présenté et la cohésion entre les contraintes pédagogiques (Fowler, 2015).

Par ailleurs, l'intégration des technologies immersives demande également aux personnes enseignantes d'adapter leurs pratiques. Cette adaptation des pratiques se décline en trois points : le développement de compétences technologiques, l'articulation des compétences technologiques aux connaissances pédagogiques et didactiques et la mise en place d'un contexte d'apprentissage centré sur les élèves (Ifinedo et Rikala, 2019). Pour le premier point, les enseignants doivent développer leurs compétences dans l'utilisation des technologies (Ifinedo et Rikala, 2019). Pour cela, les personnes enseignantes doivent avoir les moyens d'accroître leurs connaissances technologiques, des opportunités de découvrir et d'expérimenter l'utilisation des technologies, et des formations initiales et continues qui soutiennent ce développement, ce qui ne dépend pas entièrement d'elles ni des développeurs de technologies immersives (Ifinedo et Rikala, 2019; Morales, 2019). Le deuxième point met en lumière qu'en plus de développer leurs compétences spécifiques sur l'utilisation de la technologie, les personnes enseignantes doivent articuler ces connaissances à leurs compétences pédagogiques et didactiques. Par exemple, les personnes

enseignantes doivent distinguer les apprentissages qui peuvent être favorisés par les technologies immersives, prendre en compte la familiarisation par les élèves avec la technologie, d'organiser des activités compatibles avec les atouts technologiques, etc. (Fowler, 2015; Ifinedo et Rikala, 2019; Pedaste et al., 2020). Ces tâches d'évaluation et d'intégration critiques requièrent du temps et un accompagnement supplémentaire. Enfin, les atouts des technologies immersives favorisent la mise en action de l'élève plutôt que la seule démonstration, mise en action qui nécessite des situations d'apprentissage centrées sur l'élève plutôt que l'enseignant. Ainsi, les personnes enseignantes doivent à la fois intégrer les technologies appropriées dans leurs classes, en fonction des objectifs et des contextes d'apprentissage, et rendre leurs classes appropriées à l'utilisation de ces technologies (Cox, 2012; Fowler, 2015).

Dans cette ligne de pensée, plusieurs auteurs notent que la technologie immersive ne donne pas de meilleurs résultats que d'autres technologies si elle n'est pas accompagnée d'un contexte et d'une méthode d'enseignement appropriée (Huang et al., 2022; Klingenberg et al., 2020; Pande et al., 2021). Une manifestation de l'importance de l'harmonie entre les technologies immersives et les contraintes pédagogiques est la confusion dans les résultats de recherche sur l'impact des technologies immersives sur la charge cognitive. Certaines recherches suggèrent que les technologies immersives réduisent la charge cognitive des activités d'apprentissage, alors que d'autres soulignent l'inverse (Akçayır et Akçayır, 2017; Chang, 2021; Kececi et al., 2021). Ces constats mettent en évidence que les technologies immersives peuvent tout autant faciliter que complexifier le raisonnement des élèves, ce qui met en évidence l'importance des contraintes pédagogiques et didactiques (Fowler, 2015; Klingenberg et al., 2020). Toutefois, les facteurs qui influencent cette interaction ne sont pas encore bien définis (Huang et al., 2022). Ainsi, les limites

et les contraintes didactiques de l'utilisation des technologies immersives sont encore à explorer (Huang et al., 2022; Marzin-Janvier et Kermen, 2015). Celles-ci sont pourtant d'autant plus importantes à connaître que les environnements virtuels ne peuvent pas permettre d'improvisation ou d'ajustement sur le plan didactique ou pédagogique (Marzin-Janvier et Kermen, 2015). Les acquis et les obstacles des élèves, de même que leurs façons d'appréhender les situations d'apprentissage, doivent donc être prévus.

7. SYNTHÈSE ET OBJECTIF GÉNÉRAL DE RECHERCHE

Nous avons montré plus haut que les difficultés des élèves prennent naissance dans leur façon de se représenter la réalité, laquelle est attachée à la perception sensible plutôt que la recherche d'une représentation conceptuelle abstraite et cohérente. En se représentant chaque phénomène comme un ensemble de faits distinct, expliqué par ce qu'on en observe au premier regard et avec une cause unique et immédiate, les élèves ne développent pas une interprétation commune des différents phénomènes chimiques analogues (Ballini et al., 1997; Chi et al., 2012; Watson et al., 1997). Ce faisant, ces représentations entrent en contradiction avec les tâches d'apprentissage de la chimie, puisqu'elles déconnectent le langage chimique des idées et des relations qu'il établit, qui ne sert donc plus d'outil pour représenter les interactions d'un système holistique de molécules, ce qui se voit dans de nombreuses recherches se penchant sur l'interprétation des élèves (BouJaoude et Barakat, 2003; Cakmakci, 2010; Canac et Kermen, 2018; Cheng, 2018; Coll et Treagust, 2001; Fang et al., 2014; Grosslight et al., 1991; Harrison et Treagust, 1996; Kermen, 2018; Taber, 2013; Tyson et al., 1999). En conséquence, plutôt que d'aider les élèves à résoudre les problèmes dans l'apprentissage de la chimie et à servir de base

pour interpréter les observations empiriques à partir d'idées générales et de relations communes, ces représentations forment une explication parallèle et le langage chimique devient un algorithme mathématique à la signification nébuleuse et peu mobilisable pour relier les observations empiriques et les idées abstraites, comme le montrent les nombreuses recherches sur les difficultés des élèves (BouJaoude et Barakat, 2003; Haigh et al., 2012; Kermen, 2018; Laugier et Dumon, 2004; Tyson et al., 1999). Cette mise en relation est le cœur de la modélisation, qui est justement la démarche à partir de laquelle les scientifiques construisent la signification des concepts, mais une telle démarche nécessite de modifier l'approche d'enseignement dans les laboratoires chimiques, puisque l'élève doit développer le modèle au moins en partie par lui-même (Martinand, 2002). Différents outils technologiques de modélisation ont été mis au point pour faciliter ce travail, mais les études montrent que les apprentissages demeurent limités en ce qui concerne de la capacité de relier les référents empiriques et théoriques d'un phénomène scientifique (Beaufils, 2009; Orange Ravachol, 2016). La réalité virtuelle semble présenter du potentiel pour soutenir les élèves dans cette démarche (Wang-Kin, 2021; Yoon et al., 2017), mais la conciliation des contraintes didactiques et épistémologiques de la modélisation est encore à démontrer (Marzin-Janvier et Kermen, 2015).

Notre recherche s'inscrit dans cette perspective. Considérant l'ampleur des enjeux didactiques associés à la démarche de modélisation, il nous semble important de documenter l'articulation que les chercheurs font entre cette démarche et l'usage de la RV pour l'apprentissage de la chimie. Même si d'un point de vue hypothétique, plusieurs promesses peuvent être avancées, il est loisible de penser qu'une validation des recherches empiriques est nécessaire.

L'objectif de cette recherche est donc de déterminer comment les considérations didactiques des environnements de réalité virtuelle pour la modélisation ont été abordées dans les recherches scientifiques. Il s'énonce comme suit :

À travers une analyse documentaire, décrire le traitement didactique associé à la modélisation en chimie lors du recours à un environnement utilisant la réalité virtuelle.

Cet objectif nécessite que les moyens et les éléments pour transposer la modélisation dans la RV soient définis clairement. Le prochain chapitre détaille en profondeur la modélisation, ses contraintes et les relations avec l'apprentissage en RV qui permettent d'inférer si cette dernière répond aux besoins des élèves pour l'apprentissage de la chimie.

DEUXIÈME CHAPITRE. LE CADRE DE RÉFÉRENCES

Ce chapitre fait la lumière sur les relations entre l'enseignement-apprentissage de la stœchiométrie, la modélisation et la réalité virtuelle. Dans la première partie, l'enseignement-apprentissage de la chimie est décortiqué pour mettre en évidence comment la modélisation guide l'élève dans l'élaboration de représentations cohérentes avec les modèles scientifiques. Cette description expose donc les contraintes de la modélisation dans l'apprentissage de la chimie. Dans la seconde partie, nous relions les contraintes de la modélisation aux contraintes de la réalité virtuelle. Cette relation fait ressortir comment les contraintes de la modélisation peuvent être traduites de façon visible dans l'enseignement-apprentissage avec la RV. Enfin, les objectifs de recherche sont spécifiés à la fin du chapitre.

1. L'ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE DE LA STŒCHIOMÉTRIE

Tous les calculs stœchiométriques sont basés sur trois concepts : le principe de conservation de la matière, le modèle atomique et la mole. Le premier concept est d'origine empirique et stipule qu'au cours d'une transformation chimique, la masse de l'ensemble des produits est la même que la masse de l'ensemble des réactifs. Ce principe, ancré dans l'expérience empirique, permet ainsi de prédire et de déduire les masses de réactifs ou de produits impliqués dans une réaction chimique, à condition de connaître la composition chimique de ces réactifs et produits. Ces derniers éléments ne sont toutefois pas possibles à déduire à partir de ce principe empirique.

Pour cette opération, il faut se référer au second concept, soit le modèle atomique. Ce concept théorise que la matière est faite d'ensembles indivisibles de particules appelés atomes. Les différents atomes peuvent établir des liaisons entre eux, pour former différents arrangements appelés molécules. Ces arrangements suivent certaines règles qui circonscrivent quelles liaisons moléculaires les atomes peuvent nouer, lesquelles permettent de prédire la composition chimique des réactifs ou des produits. Cela permet une réinterprétation théorique du principe de conservation de la matière : dans une réaction chimique, les atomes présents chez les réactifs sont les mêmes que ceux présents chez les produits; en conséquence, le nombre et les proportions d'atomes sont les mêmes pour les réactifs et les produits, même si leurs arrangements moléculaires varient. À partir de cette conjoncture, il devient possible de prédire quelles transformations chimiques sont possibles et les proportions des molécules nécessaires pour les réaliser.

Toutefois, les proportions prédites par le modèle atomique concernent un nombre de molécules, alors que les observations ne permettent de mesurer que la masse ou la concentration. C'est un problème dans la mesure où toutes les particules n'ont pas la même masse, donc qu'une masse égale de deux substances différentes ne signifie pas qu'il y a le même nombre de molécules. Pour résoudre ce problème, les chimistes utilisent un troisième concept : la mole. Ce concept statue qu'il existe un nombre de particules qui fait correspondre la masse d'un échantillon de substance à sa masse atomique ou moléculaire, établissant un ratio entre la masse et le nombre de particules. Ce ratio, appelé masse molaire, est utilisé pour faire le pont entre le nombre de particules et la masse d'un échantillon, créant une unité appelée « quantité de matières ». En conséquence, la mole permet de transformer la prédiction du modèle atomique en prédiction du résultat empirique, par l'induction d'une propriété à l'échelle atomique à un équivalent macroscopique mesurable.

L'apprentissage de la stœchiométrie ne se résume donc pas à l'apprentissage d'un système de calculs, mais à la représentation d'une transformation chimique à partir de concepts théoriques pour quantifier les matières transformées. Il faut donc établir des relations entre des concepts théoriques et des observations empiriques afin de définir la transformation opérée, puis des relations entre concepts et observations empiriques pour transformer la définition de la transformation en mesures quantifiables. Ce sont ces relations qui structurent non seulement les calculs de stœchiométrie, mais aussi les règles de nomenclature et d'écriture d'équations chimiques utilisées pour décrire les transformations chimiques (Dehon et Snauwaert, 2015).

L'apprentissage de la stœchiométrie nécessite donc une mise en relation entre les registres empiriques et théoriques, où chacun donne sens à l'autre. Dans ce cas-ci, les connaissances empiriques aident à définir les contraintes des registres théoriques, puisque les théories doivent être cohérentes avec le principe de conservation de la matière. Toutefois, le registre empirique n'explique ni comment ni pourquoi se déroulent les transformations observées. Ce sont les registres théoriques qui permettent cette reconstruction des événements, par la représentation du modèle atomique. De plus, cette mise en relation doit aider à comprendre la relation entre le langage chimique (symboles chimiques, équations, vocabulaire) et les idées/observations qui lui donnent sens (Canac et Kermen, 2018). Cette articulation entre une représentation symbolique, des concepts théoriques et des observations empiriques est le cœur de la modélisation, qui est une démarche d'enseignement inspirée de l'activité scientifique du même nom (Martinand, 2002).

1.1 La modélisation, articulation entre l'empirique et le théorique

Selon Martinand (2002), la modélisation est une démarche d'adaptation, de construction et d'utilisation des modèles scientifiques qui peut être mobilisée pour l'apprentissage. En effet, la modélisation renvoie autant à l'activité scientifique, par laquelle physiciens ou chimistes élaborent des modèles abstraits pour donner sens ou prédire les phénomènes observés, qu'à l'activité de l'élève, qui élabore des relations entre les mouvements et les vitesses d'objets qui subissent un choc (Martinand, 2002). Cette activité prend sa source dans la mise en relation entre un référent empirique, constitué des phénomènes et d'objets analysés, avec les idées théoriques abstraites et théoriques qui permettent de comprendre ces phénomènes, par l'intermédiaire des modèles et des concepts (Martinand, 2002). Le modèle est donc à la fois une façon de concrétiser une théorie et une façon de rendre abstrait le monde empirique.

Dans cette perspective, le modèle est « une construction de l'esprit qui se substitue à l'objet réel pour l'ensemble des opérations qu'on peut effectuer sur ce dernier » (Host, 1990, dans Astolfi et Drouin, 1992, p. 67). Ainsi, le modèle permet de réfléchir sur le fonctionnement du réel à partir d'idées abstraites qui ont une plus grande portée explicative que la compilation des observations. C'est ce qui fait dire à Host : « Dans de nombreux cas, le visible complexe est remplacé par un invisible simple. Dans d'autres cas, la modélisation se limite à une relation mathématique » (Astolfi et Drouin, 1992, p. 67). Toutefois, pour que le modèle soit scientifique, Martinand (2002) postule que ce dernier doit être hypothétique, modifiable et contextualisé (p. 1).

Cette mise en relation est explicitée dans le schéma suivant :

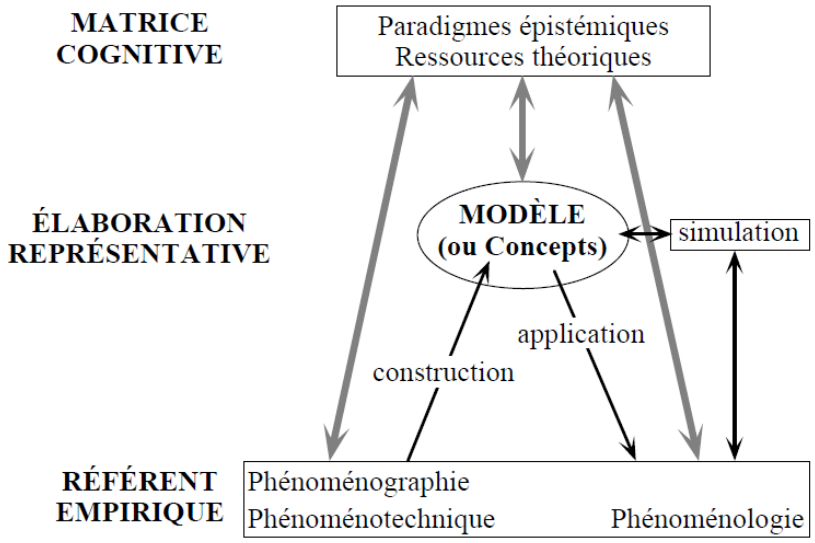


Figure 1. Schéma de modélisation selon Martinand (2002)

Cette distinction entre les référents est essentielle pour la réalisation de la démarche de modélisation, et ce, du point de vue didactique et épistémologique, parce que les évolutions, les modifications et les propriétés du modèle ne sont pas les mêmes que celles des objets ou des phénomènes (Chomat et al., 1992). Par exemple, la théorie thermodynamique n'explique pas la fonte de la glace par le fait que les molécules d'eau fondent, mais parce que la chaleur fournie les accélère et les éloigne, générant des mouvements, des conformations et des dispositions moléculaires plus désordonnées, en vertu du concept d'entropie. Ce désordre entropique explique que le liquide ait un volume délimité, mais pas une forme délimitée, contrairement au solide qui a un volume et une forme délimités. Ainsi, le caractère « désordonné » des molécules d'eau se définit par des modalités différentes du caractère « désordonné » de la glace et de l'eau liquide. Cet exemple met en exergue que l'interprétation des phénomènes par les modèles est un processus

de traduction par des symboles et des idées, pas une reproduction (Martinand, 2002). Dès lors, il est primordial d'enseigner les modèles comme des outils d'intelligibilité, et non comme des répliques d'une réalité (Astolfi et Drouin, 1992).

Toutefois, cette autonomie du modèle par rapport au phénomène est limitée, car le modèle est toujours établi en relation avec un phénomène (Orange, 1994). De ce fait, la mise en relation du référent empirique avec le modèle est essentielle pour que le modèle soit soumis à l'expérimentation. Les caractéristiques du modèle doivent donc être suffisamment concrètes pour être reliées aux effets observables du phénomène. Sans cette relation vérifiable, le modèle ne peut être soumis à une validation par les élèves, donc il perd son caractère hypothétique.

D'autre part, l'autonomie du modèle est aussi limitée par le fait que le phénomène contribue à définir le modèle lui-même. Par exemple, pour comprendre la distinction entre chaleur et température, il faut utiliser un contexte qui justifie leur indépendance. Par contre, la chaleur n'est pas directement mesurable, contrairement à la température. L'indépendance des deux concepts ne peut donc pas être justifiée avant l'expérience, car elle ne prend sens que face au problème posé par les différences de variations de température dans le chauffage des matériaux. Dans ce contexte, la relation entre la matrice cognitive et le référent empirique ne peut être établie que lorsque l'expérience expose les limites dans la réalité qui justifient l'utilisation du modèle (Orange, 2005). Cet exemple expose que la validation du modèle ne passe pas seulement par la vérification du modèle dans une expérience, mais peut procéder d'une élaboration à partir de l'expérience (Martinand, 2002).

Dans tous les cas, la nécessité de distinction et d'association entre référents expose l'importance de la problématisation, qui correspond à une mise en tension des connaissances empiriques et des explications abstraites, pour que la modélisation entraîne l'élève à valider le modèle (Orange, 2005). Les modèles scientifiques répondent à des problèmes qui définissent leurs contextes et limites d'application (Martinand, 2002; Orange, 2007). De façon concurrente, ces problèmes contribuent aussi à définir les concepts et les représentations symboliques des phénomènes. Pour que l'apprenant associe le modèle au référent empirique, il doit donc être placé dans une situation où il doit définir le problème afin de le relier au modèle/concept à apprendre (Orange, 2007).

1.2 La problématisation, l'ancrage contextuel qui donne sens au modèle

Pour Orange (2005), la problématisation consiste à créer une tension dynamique entre le savoir, la solution et le problème, tension qui crée la nécessité d'une connaissance ou solution théorique. La spécificité de la problématisation scientifique vient dans l'apodicité des savoirs qu'elle permet (Orange, 2007). Cette apodicité entraîne un renversement du rôle du problème scientifique par rapport au problème technique : plutôt que de servir de contraintes pour trouver la solution pratique, le problème scientifique permet d'explorer les explications possibles jusqu'à leurs limites (Orange, 2005). De là découle le caractère abstrait et général « qui fait qu'elles [les solutions] dépassent les cas sur lesquels elles sont construites » (Orange, 2007, p. 8). Ainsi, le travail de problématisation ne se fait pas seulement en amont de l'activité scientifique, pour trouver une solution, mais participe à la redéfinition de la situation, du savoir et du problème (Orange, 2005). Cette définition de la problématisation expose deux grandes lignes pour des activités de

modélisation : il doit y avoir un problème initial à résoudre, qui structure la représentation empirique du phénomène, puis un réinvestissement du modèle, qui justifie la pertinence des paradigmes épistémiques et des ressources théoriques (Lemeignan et Weil-Barais, 1992; Orange, 2005).

1.2.1 Le problème initial, une phénoménographie pour le novice

La création d'une tension entre le référent empirique et la matrice cognitive implique la création d'un problème initial, lequel n'est pas obligatoirement scientifique, mais déclenche un besoin d'explication (Orange, 2005). Aucun modèle n'est développé sans objectif et sans contexte, et le problème, qu'il soit technique (orienté vers le contrôle des actions sur l'objet) ou scientifique (orienté vers la compréhension du fonctionnement de l'objet), doit mettre en valeur la nécessité d'une représentation qui interprète le référent empirique (Martinand, 2002). Cette nécessité ne peut apparaître que si les informations accessibles dans le référent empirique ne sont pas suffisantes pour trouver une explication au problème posé, ce pour quoi le modèle représente une abstraction par rapport à la situation qu'il représente (Martinand, 2002; Orange, 1994, 2005). Pour ce faire, la situation doit faire émerger un vide entre les connaissances factuelles et les explications possibles de ces mêmes connaissances à partir du référent empirique. Ce vide doit être explicité et appréhendable pour les élèves, puisque ces derniers ne perçoivent pas les liens implicites entre les connaissances visées et la situation de laboratoire (Martinand, 2002; Marzin-Janvier, 2013). Or, ce vide ne peut être explicité d'un point de vue théorique qu'auprès de personnes qui ont déjà une maîtrise suffisante des modèles et des théories d'un domaine scientifique (Orange, 1994). De ce fait, la prise en charge de la construction du modèle par l'élève passe par la phénoménographie,

puisque la mise en évidence de la tension entre les référents nécessite une certaine description des événements avant de pouvoir être interprétée (Martinand, 2002; Orange, 2005; Ruthven et al., 2009).

Par ailleurs, cette mise en tension peut être utilisée pour familiariser et normaliser les descriptions des phénomènes à l'aide des concepts et des instruments scientifiques (Genzling et Pierrard, 1994; Tiberghien et al., 2009). Cette normalisation est importante parce que l'interprétation phénoménologique des phénomènes naturels ne se fait pas avec les mêmes outils intellectuels pour les élèves et les enseignants, ce qui fait en sorte qu'une description empirique non dirigée n'amènera pas les élèves vers les descriptions scientifiques attendues (Chi et al., 2012; Haigh et al., 2012; Martinand, 2002). Il est donc nécessaire d'expliciter les points sur lesquels les descriptions doivent porter, les instruments et les concepts utilisés pour élaborer la description et un certain objectif à cette description (Genzling et Pierrard, 1994; Tiberghien et al., 2009).

Pour opérer cette normalisation, il faut démontrer que les outils et les descriptions peuvent être utilisés de la même façon pour représenter différentes situations empiriques. C'est par la multiplicité des situations empiriques possibles à représenter avec un modèle que celui-ci met en évidence les correspondances abstraites entre le modèle et le référent empirique, d'une part, et la nécessité des concepts issus du modèle pour représenter une situation (Genzling et Pierrard, 1994). De plus, cette normalisation permet aux élèves de définir la signification des concepts d'un point de vue scientifique, créant une distinction entre le sens commun et le point de vue scientifique (Orange, 2005; Tiberghien et al., 2009). La mise en évidence de cette distinction est nécessaire pour que les élèves établissent des liens entre les propriétés qu'ils accordent aux objets et les

propriétés utilisées par les concepts scientifiques (Tiberghien et al., 2009). Cette distinction peut ensuite être utilisée pour comparer les descriptions empiriques à l'aide des outils communs et les descriptions à l'aide des concepts scientifiques (Tiberghien et al., 2009). Le développement du modèle est donc intégré au passage d'une description phénoménographique à une description phénoménologique.

1.2.2 Le problème reconstruit, réinterprétation phénoménologique

Après avoir construit le modèle pour résoudre le problème initial, il est nécessaire d'appliquer ce modèle dans le registre empirique afin d'intégrer le modèle comme un outil d'interprétation qui se substitue à la réalité, qui l'interprète de façon cohérente et évaluer le potentiel explicatif du modèle (Genzling et Pierrard, 1994). C'est ce qui explique que l'analyse des données est essentielle pour faire le pont entre le référent empirique et le modèle (Darley et Marzin-Janvier, 1998, cité dans Marzin-Janvier, 2013). C'est dans cette démarche d'analyse que le modèle peut véritablement servir à interpréter de manière abstraite le phénomène étudié, donc développer une phénoménologie chez l'élève (Genzling et Pierrard, 1994; Orange, 1994, 2007). On observe ici une convergence entre les propos d'Orange (2005, 2007) et ceux de Martinand (2002) : c'est par la redéfinition de la situation que la résolution du problème initial étend son pouvoir d'explication à d'autres situations et prend son sens aux yeux des élèves. Dans le cas de la problématisation, cela s'explique parce que c'est une fois le problème reconstruit dans un registre scientifique que les apprenants peuvent identifier la nécessité des contraintes du modèle (Orange, 2005, 2007). Dans le cas de la modélisation, c'est parce que l'apprenant doit considérer le modèle comme un support explicatif phénoménologique suffisant pour se substituer au référent

empirique (Orange, 1994). C'est ce qui explique que « ce saut dans l'imaginaire, ce "pari" ne peut, de fait, être justifié a priori, mais seulement a posteriori, en termes de "gain du pari", de fécondité au regard des finalités auxquelles répond la construction du modèle » (Chomat et al., 1992, p. 120). Ce « gain du pari » représente un changement de perspective épistémologique et épistémique qui dépasse la compréhension du concept et du modèle pour une situation particulière.

Ce dernier aspect expose que la modélisation repose sur une tâche de représentation. C'est par la représentation du phénomène que les relations mathématiques ou logiques peuvent prendre la forme d'une explication plutôt que de constat (Martinand, 2002; Marzin-Janvier, 2013). De plus, c'est la représentation qui permet d'établir les relations entre les codes symboliques et les signifiés des concepts et des modèles (Genzling et Pierrard, 1994). Il apparaît donc nécessaire de détailler comment la représentation aide à structurer la démarche de modélisation.

1.3 La représentation mentale, clé de voûte de l'interprétation des expériences

Les modèles et la modélisation sont associés à trois grandes fonctions : la représentation, l'explication et la prédiction (Genzling et Pierrard, 1994; Martinand, 2002). Toutefois, dans son fonctionnement, l'explication et la prédiction se construisent à partir de la représentation (Martinand, 2002). Si les relations qui forment le modèle permettent de prédire des événements dans le référent empirique, c'est parce que la correspondance entre le modèle et le référent empirique permettent de manipuler intellectuellement le modèle comme si c'était la réalité (Genzling et Pierrard, 1994; Martinand, 2002; Orange, 1994). L'explication par le modèle nécessite aussi de voir le modèle comme une image manipulable des caractéristiques essentielles du référent empirique qui permet de substituer un objet impossible ou difficile à décrire en entier

(Genzling et Pierrard, 1994; Orange, 1994). La construction du code signifiant comme de la signification des concepts passe également par des analogies et des tâches de représentations, qu'il s'agisse des relations entre les objets ou des propriétés des objets (Genzling et Pierrard, 1994). La représentation n'est donc pas pour la modélisation que l'objectif de la démarche, mais est omniprésente dans le processus de la mise en relation entre l'abstrait et le concret (Marzin-Janvier, 2013). Il s'agit de la tâche qui assure la cohérence entre la démarche expérimentale, la formulation d'hypothèses et l'analyse de données. C'est dans cette perspective que la modélisation implique nécessairement une prise en charge de la construction du modèle par l'élève : l'élève ne peut « représenter » le phénomène et élaborer les relations entre le modèle et le phénomène si cette représentation est construite et imposée d'avance (Martinand, 2002). L'élaboration de la représentation doit donc être la tâche de l'élève et ce dernier doit avoir suffisamment de liberté pour explorer les limites des représentations qu'il produit.

La recherche de ces représentations doit toutefois être contrôlée par certaines contraintes pour arriver à un bon modèle. En effet, plusieurs représentations différentes pourraient expliquer le même référent, comme l'histoire des sciences le montre à de nombreuses reprises, ne serait-ce qu'avec l'évolution du modèle atomique (Laugier et Dumon, 2004). La contrainte la plus importante est celle de l'unification de la représentation : le modèle doit être en mesure de représenter plusieurs situations empiriques avec un minimum de modifications (Larcher, 1994). La recherche d'une représentation uniforme met en évidence l'interprétation commune d'un ensemble de phénomènes, ce qui permet de structurer à la fois la signification d'un concept précis et sa relation avec les phénomènes observés, les deux étant nécessaires pour interpréter le référent empirique (Genzling et Pierrard, 1994). Cette structuration est essentielle pour normaliser les

descriptions phénoménologiques et pour démontrer que les descriptions issues du modèle correspondent suffisamment au référent empirique pour en constituer une interprétation cohérente (Chomat et al., 1992; Tiberghien et al., 2009). La recherche d'une représentation uniforme implique donc que le modèle soit appliqué à plusieurs situations, sans quoi la représentation ne peut être considérée comme uniforme.

Une autre contrainte essentielle de la représentation dans la modélisation est la cohérence interne des modèles développés. En effet, pour qu'un modèle puisse distinguer les représentations possibles et les représentations impossibles d'un phénomène, il doit avoir des règles et des contraintes qui délimitent le fonctionnement du modèle; en l'absence de ces règles, le modèle ne peut être soumis à une vérification, puisqu'il n'y a aucune limite qui pourrait justifier l'inadéquation du modèle (Orange, 1994). Le modèle perd alors tout pouvoir prédictif, ainsi que son caractère hypothétique et sa validité aux yeux des élèves (Chomat et al., 1992; Martinand, 2002). Par ailleurs, la cohérence interne est aussi importante pour distinguer le modèle de la réalité qu'il représente. En effet, si les règles et les contraintes du modèle sont cohérentes en soi, il devient un outil crédible pour interpréter la réalité sans y correspondre, ce qui le rend distinct de la réalité étudiée (Larcher, 1994; Martinand, 2002). C'est à ce moment qu'il peut être utilisé pour soumettre des propositions vérifiant la correspondance entre le référent empirique et le modèle (Larcher, 1994; Orange, 1994). La contrainte de cohérence interne implique donc que l'activité de modélisation doit entraîner une réflexion sur la signification des concepts.

Les contraintes d'uniformité et de cohérence interne mettent en lumière que la représentation sert à développer une structure de raisonnement, structure liée tant au problème à

résoudre qu'aux schèmes intellectuels des différentes traditions de recherche (Orange, 2005). Toutefois, elles ne permettent pas de définir cette structure. La prochaine section détaillera la structure de raisonnement qui oriente l'interprétation des phénomènes chimiques.

2. LA STRUCTURE DES REPRÉSENTATIONS ET DES MODÈLES EN CHIMIE

La chimie étudie la transformation de la matière, transformation dont les conséquences sont parfois visibles, mais dont le processus ne l'est pas. De facto, une des premières fonctions des modèles est de représenter la matière à une échelle réduite pour concilier la transformation des objets avec certaines invariances observables dans leurs quantités (Laugier et Dumon, 2004). En conséquence, les modèles chimiques superposent les descriptions phénoménologiques et les descriptions phénoménographiques des phénomènes chimiques, puisque dans les deux cas il s'agit d'une description de la matière et de son comportement (Orange, 1994). Les modèles chimiques fonctionnent donc toujours par une mise en relation de concepts dans un contexte (Taber, 2013).

Toutefois, la superposition des descriptions phénoménographiques et phénoménologiques ne signifie pas que tous les concepts ont la même fonction dans la description du phénomène; ainsi, certains modèles sont utilisés pour représenter différents aspects d'un même phénomène à différentes échelles (Négrier et Kermen, 2011). Par exemple, la loi de Henry n'utilise pas le concept d'atomes de la même façon que les mécanismes réactionnels d'oxydoréduction, puisque dans le premier cas, c'est l'indivisibilité de l'atome qui explique les proportions de gaz dissouts trouvées dans un système chimique, alors que c'est la structure des atomes qui permet d'expliquer les transferts de charges électriques dans le second cas; or, dans le premier cas, l'indivisibilité de l'atome est utilisée pour décrire des interactions entre deux groupes de molécules homogènes, alors

que la structure des atomes est utilisée pour décrire les interactions entre deux atomes différents, ce qui renvoie à des échelles et des conceptualisations différentes (Taber, 2013). Pourtant, tant la loi de Henry que le mécanisme d'oxydoréduction peuvent être nécessaires pour décrire un système chimique où il y a échange d'électrons entre un gaz et un liquide. Cet exemple illustre que les modèles développés en chimie tissent des relations non seulement entre concepts et contexte empirique, mais aussi entre différentes échelles de description; ces échelles sont appelées niveaux de savoirs et renvoient aux rôles d'un concept pour la description phénoménologique (Johnstone, 1993; Kermen et Méheut, 2009; Taber, 2013).

Plusieurs typologies des niveaux de savoirs ont été développées et sont encore utilisées à ce jour (Dehon, 2018). Le cadre du « tétraèdre chimique » développé par Kermen et Méheut (2009) apparaît le plus pertinent, puisqu'il distingue plus clairement ce qui relève d'une conceptualisation d'une dynamique macroscopique de ce qui relève de la description empirique, et la description symbolique des autres descriptions (Dehon, 2018). La première distinction le rend facile à concilier avec la distinction entre phénoménographie et phénoménologie, alors que la seconde est cohérente avec la distinction entre la matrice cognitive, le modèle et le référent empirique (voir figure 1). De plus, considérant les difficultés des élèves à établir les relations entre les symboles, la nomenclature et les concepts théoriques, il apparaît pertinent d'en faire un registre de connaissance distinct des autres, puisque la représentation n'est pas un allant de soi, ce qui va à l'encontre du supposé théorique du triplet chimique de Taber (2013).

Dans ce cadre, les concepts abstraits sont répartis en deux niveaux : un niveau macroscopique et un niveau microscopique. Les concepts macroscopiques sont distingués des

concepts microscopiques par leur ancrage dans une dynamique impliquant un ensemble de particules. Par exemple, Kermen et Méheut (2009) spécifient que la description d'une réaction chimique en termes de transformation de quantités de molécules relève du niveau macroscopique, alors que la description précise du mécanisme de réarrangement moléculaire relève du niveau microscopique. De plus, Kermen et Méheut (2009) définissent un niveau de savoir « empirique », qui englobe les observations et descriptions empiriques qui peuvent être faites avec les sens ou avec les concepts mesurables à l'aide d'instruments (pH, température, absorbance, etc.). Le niveau symbolique renvoie quant à lui aux connaissances strictement liées à l'utilisation du langage chimique, comme les règles de nomenclature ou les définitions du vocabulaire (Dehon, 2018). L'ensemble du cadre est représenté dans la figure suivante :

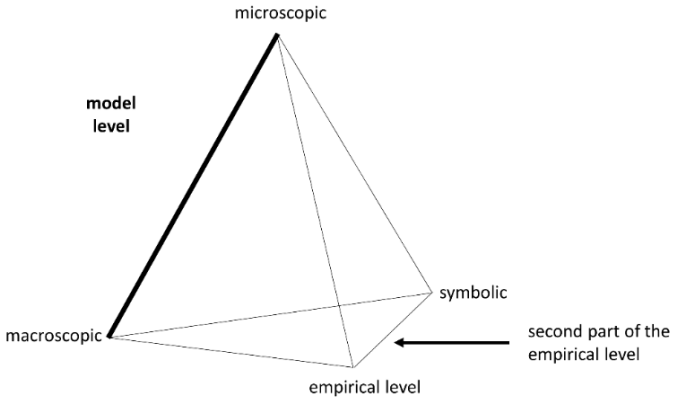


Figure 2. Tétraèdre chimique selon Kermen et Méheut (2009)

Cette catégorisation met en évidence les relations entre différents concepts de chimie et le référent empirique qui doivent être transposées dans le modèle, ce qu'Orange (1994) appelle « le jeu des modèles » (p. 36). Par exemple, pour voir le pH comme une concentration d'ions H+, il

faut établir une relation entre le niveau empirique (les solutions aux pH différents ont des effets différents sur les indicateurs de pH) et le niveau macroscopique (plus il y a d'ions H+ dans une solution, plus l'effet d'un acide est prononcé). Cette relation est transposable dans une expérience centrée sur l'effet des proportions d'acides (ou de bases) et de solvant dans les solutions sur le changement ou les indicateurs de pH, puisque la dimension macroscopique nécessite la mise en perspective des différences induites par la quantité d'ions. Cet exemple illustre qu'en décortiquant les relations présentes dans le modèle scientifique, le tétraèdre chimique met en évidence la structure d'un modèle scientifique représentant un phénomène chimique, puis quels éléments du référent empirique peuvent mettre en évidence cette structure. Ce faisant, le tétraèdre chimique expose comment les concepts permettent une réinterprétation phénoménologique à partir d'une description phénoménographique à partir des mêmes éléments du registre empirique.

Dans la même ligne, la compréhension des relations entre niveaux de savoirs permet de relier la problématisation à la modélisation. En effet, comme les relations entre les niveaux de savoirs conceptuels et le niveau de savoir empirique éclairent le passage de la phénoménographie à la phénoménologie, elles éclairent également le passage d'un problème pratique à un problème scientifique. De plus, l'analyse des relations entre niveaux de savoirs peut faire ressortir pourquoi les concepts sont nécessaires, donc quelles contraintes placer au centre du problème pour donner du sens au modèle.

Enfin, en analysant les relations entre le niveau de savoir symbolique et les autres niveaux de savoirs, le tétraèdre chimique aide à comprendre comment lier la structure conceptuelle du modèle à la structure du code signifiant. Comme les relations entre les différents niveaux de savoirs

et le niveau symbolique servent de base pour définir les règles du langage chimique, elles peuvent également servir de lignes directrices pour baliser l'élaboration du code signifiant utilisé par les élèves lors de l'élaboration du modèle.

3. EN SYNTHÈSE

Les fondements théoriques sur la modélisation indiquent que certaines contraintes épistémologiques sont essentielles pour que les élèves établissent la relation entre le référent empirique et la matrice cognitive. Ces contraintes sont : 1) une étape de problématisation; 2) le développement d'une représentation utilisée dans l'ensemble de la démarche expérimentale (formulation d'hypothèses, protocole expérimental, analyse des résultats, etc.); et 3) la prise en charge par l'élève (en tout ou en partie) de cette tâche de représentation et de la démarche expérimentale. La première est essentielle pour que l'élève comprenne la pertinence du modèle élaboré. La seconde est ce qui permet à l'élève d'utiliser le modèle comme un outil d'appréhension de la réalité. La troisième est la condition pour que l'élève adopte une démarche critique et scientifique dans l'élaboration du modèle. Ces trois contraintes devraient donc être conciliables et présentes dans les environnements de RV pour l'apprentissage de la chimie.

De plus, les modèles développés dans cette tâche doivent avoir certaines caractéristiques. Selon Martinand, un modèle scientifique doit être : 1) hypothétique, donc sujet à une démarche de validation expérimentale; 2) modifiable, sans quoi il ne peut être adapté à différentes situations; et 3) contextuel, sans quoi il ne peut être problématisé ni relié au référent empirique (Martinand, 2002). Le tétraèdre chimique indique quant à lui qu'un modèle développé en chimie doit interpréter une situation en représentant à l'aide de concepts abstraits les transformations observables

empiriquement à partir d'un code symbolique qui reproduit les relations entre le référent empirique et les concepts abstraits. L'établissement de ces relations doit donc être au centre de la démarche de modélisation pour que le modèle développé par les élèves soit pertinent pour la compréhension de la chimie.

4. LA RÉALITÉ VIRTUELLE : POINT DE VUE DIDACTIQUE

Les contraintes épistémologiques et didactiques de la modélisation en chimie ayant été décrites, il faut s'attarder à la RV pour comprendre comment ces contraintes peuvent être intégrées à cette technologie. Pour cela, il est nécessaire de détailler comment la RV peut être liée à l'apprentissage et l'enseignement.

Dalgarno et Lee (2010) notaient que le sentiment d'immersion créé par la RV favorisait la contextualisation et le transfert d'apprentissage, en plus de favoriser le développement de la visualisation spatiale. Ces prédictions partaient du point de vue que les apprenants apprennent dans les environnements de la RV d'une façon comparable aux environnements réels, c'est-à-dire par l'interaction avec l'environnement (Dalgarno et Lee, 2010). Toutefois, les environnements de RV peuvent contourner certaines contraintes spatiotemporelles, permettant un nombre illimité de répétitions d'expérience et annulant les conséquences possibles des expériences réelles (Dalgarno et Lee, 2010). Tous ces éléments pointent vers le fait que l'apprentissage avec la RV est intimement lié à l'expérience que l'apprenant vit à l'intérieur de la RV (Fowler, 2015). Dans cette veine, plusieurs recherches exposent que la RV en tant que telle n'a qu'un effet indirect sur l'apprentissage. En effet, une étude de Huang et al. (2022) a exposé que l'immersion favorise directement la motivation, laquelle influence l'engagement et la charge mentale des élèves dans la

tâche, sans voir d'effet direct de l'immersion sur l'activité mentale des élèves. Ainsi, pour comprendre comment la RV peut être un outil de modélisation, il faut d'abord comprendre comment le contexte dans lequel l'élève est plongé peut être source d'apprentissage en RV.

4.1 L'apprentissage par le contexte

Selon Dawley et Dede (2014), les environnements virtuels immersifs favorisent l'apprentissage parce qu'ils placent les élèves dans un contexte où leurs actions ont un impact sur leur environnement. C'est par l'analyse de l'expérience que les élèves peuvent mettre à l'épreuve leurs hypothèses, étudier l'effet de leurs actions sur l'environnement virtuel, identifier les facteurs qui influencent l'environnement, etc. (Dawley et Dede, 2014). Les auteurs indiquent ainsi que la RV est un bon moyen de créer un transfert d'apprentissage, soit l'application d'un savoir dans des situations contextualisées et différentes des situations où les élèves ont appris le savoir (Dawley et Dede, 2014; Dunleavy et Dede, 2014). Dans cette perspective, l'environnement virtuel remplace le référent empirique, puisqu'il projette l'aspect concret de l'expérience. L'environnement virtuel devient donc le lieu où le modèle est traduit, et non une représentation manipulable du référent empirique (Beaufils, 2009). Il peut donc servir de matrice expérimentale, puisque le contournement de barrières physiques permet de répéter et modifier facilement et fréquemment une expérience, à l'instar des essais à faire dans une expérience scientifique (Dawley et Dede, 2014). En conséquence, les contraintes didactiques de la modélisation doivent être transposables dans le contexte de l'environnement virtuel.

Par exemple, pour qu'un environnement virtuel soit une matrice adéquate de modélisation, le contexte utilisé doit créer une relation étroite entre les actions des élèves et le modèle ou la

matrice cognitive à explorer. En effet, si le contexte est la traduction du modèle, ce dernier doit faciliter l'exploration de la relation entre les concepts abstraits à représenter et l'expérience concrète. Cette contrainte implique que le contexte de l'environnement virtuel soit propice à la problématisation du contenu à enseigner, sans quoi l'élève n'a pas besoin de développer une représentation du phénomène. Il est donc essentiel que le contexte de l'environnement de réalité virtuelle plonge l'élève dans la découverte de la tension entre le référent empirique et le modèle pour donner un sens à la recherche d'une représentation abstraite de l'expérience concrète. Dans le cas de la chimie, cela implique que le contexte impose l'interprétation de connaissances empiriques par des connaissances conceptuelles macroscopiques ou microscopiques (Kermen et Méheut, 2009).

De plus, l'établissement de relations étroites entre le contexte et le modèle à représenter implique que l'élève puisse explorer et modifier les variables du phénomène. En effet, si les élèves ne peuvent pas modifier le cours de leurs actions, ils ne peuvent pas vérifier l'impact de leurs actions sur l'environnement virtuel. Incidemment, l'environnement virtuel doit placer l'élève dans une situation d'exploration pour que celui-ci puisse explorer les relations à établir à partir de ces actions, ce qui implique que l'environnement doit laisser une certaine autonomie à l'élève dans cette exploration.

Avec l'optique de transfert d'apprentissage, les auteurs mettent en lumière que la RV peut utiliser le contexte pour projeter l'application d'un savoir, ce qui indique que le contexte servirait au décodage phénoménologique (Björn et al., 2021). Toutefois, si l'apprentissage doit avoir lieu grâce au contexte, alors le contexte ressemble davantage à une matrice phénoménographique que

phénoménologique. Cette ambivalence expose que le contexte d'un environnement de réalité virtuelle, en tant que matrice à représenter, ne met pas en évidence un effet de la RV sur la façon de structurer la tâche de représentation. Cette possibilité nécessite qu'on définisse comment les avantages de la RV peuvent être liés à la construction de l'activité et du modèle.

4.2 L'interaction entre le contexte et les propriétés technologiques

Fiorella et Mayer (2021) énoncent que l'utilisation d'un média virtuel, même s'il est fonctionnel, immersif et attrayant, n'entraîne pas d'apprentissage si l'élève n'essaie pas de donner un sens au matériel d'apprentissage (p. 339). En s'appuyant sur la théorie de l'apprentissage génératif, ces auteurs affirment que cette construction de sens résulte de l'élaboration d'une structure cohérente de raisonnement à partir des informations apprises dans une situation d'apprentissage, puis de son intégration dans la mémoire à long terme (Fiorella et Mayer, 2021, p. 339). L'apprentissage ne dépend donc pas uniquement de la stimulation des élèves, mais aussi d'une analyse en profondeur de leur expérience pour en déduire une représentation mentale (Klingenberg et al., 2020). Cette perspective est cohérente avec la démarche de la modélisation, où l'observation du référent empirique sans travail d'abstraction n'est pas garante d'une élaboration théorique pertinente et où l'élaboration d'une représentation est essentielle pour faire le pont entre le contexte de l'expérience et le savoir à déduire (Astolfi et Drouin, 1992; Genzling et Pierrard, 1994).

Les auteurs déclinent deux types de contraintes pour favoriser la construction de sens par l'élève avec la RV : des contraintes liées à la présentation du savoir et des contraintes liées à l'activité de l'élève. Les premières exposent un certain nombre de principes pour diriger les élèves

dans l'activité, alors que les secondes définissent des stratégies pour amener les élèves à exprimer leurs réflexions suite à l'expérience vécue.

4.2.1 Les contraintes de la présentation du savoir

Pour illustrer les contraintes liées à la présentation du savoir, on peut nommer les principes de concrétisation, d'ancrage et de découverte guidée (Mayer, 2014). Le principe de concrétisation indique qu'il est préférable d'aborder les concepts étrangers à l'élève à partir d'exemples ou de situations qui sont connues de l'élève, de sorte à rattacher les connaissances inconnues aux connaissances connues (Mayer, 2014). Le principe d'ancrage indique que les élèves apprennent mieux les concepts abstraits si la situation lie le concept abstrait à une situation concrète (Mayer, 2014). Le principe de découverte guidée indique que les élèves apprennent davantage de la résolution d'un problème s'ils sont guidés adéquatement (Mayer, 2014).

Ces trois principes mettent en évidence une convergence entre les contraintes de l'apprentissage de la RV et celle de la modélisation. Le principe de découverte guidée est similaire à la contrainte de prise en charge de l'expérimentation par l'élève, puisque dans les deux cas, les élèves doivent résoudre un problème, donc sont engagés dans une démarche expérimentale dont ils ne détiennent pas auparavant la solution. Les principes d'ancrage et de concrétisation indiquent quant à eux la nécessité d'articuler les modèles ou la matrice cognitive à la phénoménographie ou la phénoménologie, puisque dans tous les cas, on rattache un savoir abstrait à une référence accessible à l'élève.

Ces principes ne peuvent toutefois pas être liés à une propriété particulière de la RV, puisqu'ils pourraient s'appliquer à l'ensemble des TIC. Ce sont plutôt des lignes directrices qu'on peut déceler dans le contexte de l'environnement virtuel et la structure de l'activité d'enseignement-apprentissage. Par exemple, pour mettre en œuvre le principe de découverte guidée, les instructions et les informations données à l'élève avant l'activité doivent être incomplètes, sans quoi l'activité devient une démonstration et non pas une activité de découverte. De même, dans une vidéo ou dans l'information transmise par le contexte ou l'environnement, on peut inférer l'application des principes d'ancrage et de concrétisation dans le contexte de l'environnement virtuel si l'élève étudie les manifestations d'un concept plutôt que le concept lui-même, ou encore si le concept est abordé par une analogie. Toutefois, ces lignes directrices dépendent également des tâches que les élèves ont à réaliser dans l'activité, ce que ces contraintes ne peuvent éclairer complètement. Il est donc nécessaire de relier la présentation du savoir aux contraintes de la mise en action de l'élève.

4.2.2 Les contraintes de la mise en action de l'élève

En ce qui concerne la mise en action des élèves, Fiorella et Mayer (2021) classent trois types de stratégies conduisant à un apprentissage génératif : la verbalisation, la visualisation et la gestualisation. La verbalisation implique des stratégies où l'élève doit expliquer son apprentissage à partir d'un discours oral ou écrit, par exemple en rédigeant un résumé ou en enseignant à un collègue (Fiorella et Mayer, 2021); la visualisation implique des stratégies où l'élève crée une représentation graphique, qu'il s'agisse d'un dessin, d'une carte conceptuelle ou toute autre forme d'image (Fiorella et Mayer, 2021); la gestualisation implique de représenter sa compréhension des

choses par des gestes (Fiorella et Mayer, 2021). Les stratégies de visualisation et de gestualisation peuvent être directement reliées aux tâches de représentation de la modélisation. Ces stratégies apparaissent donc comme des points de repère pour vérifier l'ancrage de la modélisation dans la RV. Certaines stratégies de verbalisation pourraient également être reliées à la modélisation, puisque le modèle peut servir à expliquer et que l'explication peut servir de base à l'élaboration et l'analyse du modèle (Genzling et Pierrard, 1994).

Il est toutefois à noter que les recherches portant sur les stratégies d'apprentissage génératif sont souvent abordées d'un point de vue cognitif, comme la mesure de rétention de l'information (Fiorella et Mayer, 2021; Leopold, 2021). En conséquence, il y a une grande différence entre les stratégies d'apprentissage génératif et la modélisation : les premières ne sont pas guidées par une réflexion aux assises épistémologiques ni par la manipulation de la représentation développée. Ainsi, si la présence des stratégies d'apprentissage génératif est un point de repère pour repérer une démarche de modélisation, la prise en compte de la problématisation, de la recherche d'une représentation uniforme et cohérente sont nécessaires pour déterminer que ces stratégies correspondent à une démarche de modélisation.

À l'instar des contraintes sur la présentation du savoir, l'intégration des stratégies d'apprentissage génératif peut se vérifier dans la structure d'activité présentée dans la RV. Toutefois, cette tâche devient impossible si la RV ne présente pas ou n'est pas accompagnée d'un contexte offrant à l'élève matière à réfléchir. De facto, les stratégies d'apprentissage génératif sont intimement liées au principe de la découverte guidée et à l'utilisation du contexte comme source d'apprentissage.

5. SYNTHÈSE ET OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DE RECHERCHE

À la lumière de ce chapitre, on peut dessiner un schéma pour repérer les contraintes et les référents de la modélisation au sein d'une RV pour l'apprentissage de la chimie. Le contexte de l'activité, en tant que référent empirique, doit être sujet à différentes variations et mettre en jeu une situation favorable à la construction d'un modèle abstrait. Ce contexte doit également inclure des activités où l'élève analyse son expérience et élabore une représentation, ce qui peut se faire par différentes stratégies. Enfin, les interactions et l'interface de la RV peuvent intégrer des étayages, soit en structurant la démarche de l'élève, facilitant la manipulation et la compréhension du jeu des modèles, soit en favorisant la problématisation, reprenant le rôle de la matrice cognitive. Il y a donc des transpositions possibles des contraintes de la modélisation dans des environnements d'apprentissage de la chimie en RV.

Toutefois, le fait que les contraintes de la modélisation soient transposables dans l'apprentissage de la RV ne signifie pas pour autant qu'elles ont été prises en compte. Il importe donc d'établir si les contraintes épistémologiques de la modélisation ont été intégrées pratiquement dans les environnements d'apprentissage de la chimie en RV.

Ainsi, trois objectifs opérationnaliseront notre analyse des écrits : 1) Identifier les intentions d'apprentissage associées à la modélisation en chimie dans le cadre de l'environnement virtuel utilisé; 2) Identifier les modalités permettant de faire le lien entre le contexte généré par l'environnement de RV et les apprentissages visés; 3) Comparer les contraintes d'activités d'apprentissage générées par la RV aux différentes phases du processus didactique de modélisation.

TROISIÈME CHAPITRE. LA MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous présentons les choix méthodologiques opérés et leurs relations avec la question de recherche. La constitution du corpus et le processus de traitement des données sont décrits.

1. TYPE DE RECHERCHE

L'objectif général comme les objectifs spécifiques de cette recherche sont orientés vers la description de l'état actuel du développement de la RV comme outil de modélisation d'un point de vue didactique. De facto, cette recherche s'inscrit comme une recherche descriptive, puisqu'elle ne cherche directement ni à établir des relations causales entre l'effet de la RV sur l'apprentissage de la chimie et la mobilisation de la modélisation, ni à explorer théoriquement ou expérimentalement cette éventualité, qui est postulée possible (Gauthier, 2016). Cette visée est pertinente précisément du fait que les recherches sur l'apprentissage avec la RV tendent vers un effet indirect de la technologie sur l'apprentissage, donc que la relation entre le potentiel de la RV et l'apprentissage dépend de la cohésion entre la démarche d'enseignement-apprentissage et l'activité réalisée en RV (Huang et al., 2022; Klingenberg et al., 2020).

Étant donné cet impératif de description d'une situation à grande échelle, cette recherche doit s'appuyer sur des traces empiriques d'un ensemble exhaustif de cas interprétables à partir de notre cadre de références (Gauthier, 2016). En conséquence, l'observation directe de pratiques ne pourrait être suffisamment exhaustive pour répondre aux objectifs de recherche, puisqu'elle suppose l'analyse détaillée d'un nombre limité de cas (Martineau, 2016). C'est pourquoi nous

avons opté pour une analyse de contenu documentaire, qui permet d'adopter une perspective macroscopique à travers une recension systématique des données disponibles (Leray et Bourgeois, 2016).

2. L'ANALYSE DE CONTENU DOCUMENTAIRE

Selon Leray et Bourgeois (2016), l'analyse de contenu est une technique pour « réussir à déceler, quantifier, voire évaluer les idées ou les sujets présents dans un corpus [de documents] qui est typiquement informe » (p. 428). À travers le repérage et l'analyse systématiques des unités de sens présents dans le corpus, il est possible d'utiliser les contenus communiqués dans les documents comme source de données pour proposer des inférences et des interprétations sur l'objet de recherche (Bardin, 2013). Cette technique est appropriée à notre objectif de recherche et est un moyen efficace pour étudier à la fois le développement et l'utilisation de la RV pour l'apprentissage de la chimie, puisque certains documents peuvent mettre en évidence à la fois le contexte de la RV, l'activité réalisée par les élèves et la structure du logiciel.

Pour étudier à la fois les contextes utilisés dans les pratiques d'enseignement de la chimie en RV, les activités qui les accompagnent et les étayages au sein des applications, il est nécessaire d'avoir des traces empiriques exhaustives. En effet, l'étude seule des logiciels et des environnements ne permettrait pas de prendre en compte les divergences induites par l'utilisation de la RV. Par contre, dans des articles de recherches ou des comptes-rendus d'activités, on peut trouver autant des descriptions de l'environnement de RV que des descriptions des activités réalisées par les élèves. Ces descriptions ont donc le potentiel de présenter l'ensemble des éléments nécessaires pour déterminer si un environnement de RV est propice à une démarche de

modélisation. C'est pourquoi cette recherche entreprend d'analyser les pratiques d'enseignement-apprentissage de la chimie en RV par l'intermédiaire des documents de recherche qui les décrivent.

L'analyse de contenu se divise en trois grandes étapes : la constitution du corpus, le codage et l'interprétation des résultats (Bardin, 2013). Chacune de ses étapes doit être guidée par des barèmes scientifiques et systématiques pour se distinguer d'une analyse purement intuitive (Bardin, 2013; Leray et Bourgeois, 2016). Les prochaines sections décriront en profondeur comment notre procédure d'analyse répond à ses barèmes.

2.1 La constitution du corpus

Selon Bardin (2013), le corpus d'une analyse de contenu scientifique doit être : exhaustif, c'est-à-dire ne pas rejeter arbitrairement un document; homogène, donc que les documents analysés doivent répondre aux mêmes critères et semblables sur la forme; et pertinent, ce qui signifie que les critères élaborés et les documents saisis doivent contenir les informations qui répondent aux objectifs de la recherche. Ces balises doivent orienter l'ensemble de la sélection des documents, que ce soit les banques de données, le type de documents, les critères de sélection. Par exemple, pour que notre corpus soit pertinent, les documents recueillis doivent contenir des descriptions permettant de déterminer si et comment théorie et empirie sont articulées dans le contexte de la RV, si des étayages orientés vers la problématisation sont présents et si les contraintes de la modélisation sont présentes dans les activités. En ce qui concerne l'homogénéité, il est clair qu'il serait très difficile de comparer des vidéos et des documents écrits, même si les deux peuvent être pertinents pour notre objet de recherche. Ainsi, nous allons concentrer notre

collecte de données sur des textes, car c'est le format le plus accessible et qui explicite le plus grand nombre de contraintes des activités de classe.

Pour constituer un corpus exhaustif, nous allons effectuer une recension systématique de littérature dans les bases de données Education Source, Scopus et Learn Tech Lib. Ces bases de données anglophones ont été choisies parce qu'elles contiennent des revues spécialisées dans l'enseignement-apprentissage des sciences et de l'utilisation de la technologie dans les milieux d'éducation. Ce critère a été établi parce que c'est dans ces revues que des descriptions concomitantes d'activités et d'environnements de RV pour l'apprentissage de la chimie suffisamment peuvent se trouver. Pour recenser les travaux équivalents en français, les banques de données Persée et Open Edition Source seront incluses.

Étant donné que nous cherchons des articles détaillant des activités d'apprentissage, notre recension va se centrer sur des articles issus de recherches empiriques. Dans ce type de recherche, les chercheurs présentent généralement des modèles de mises en œuvre. Comme nous cherchons d'abord et avant tout des descriptions d'activités, les articles professionnels peuvent être une grande source de données.

2.2 Critères d'inclusion

Les articles sélectionnés devront traiter de la RV et d'apprentissage de la chimie. Pour la RV, les mots-clés utilisés seront « virtual reality », « augmented reality » et « chemistry education », qui sont des traductions de « réalité virtuelle », « réalité augmentée » et « enseignement de la chimie ». Nous pensons que la distinction entre la RV et la RA n'est pas

pertinente pour notre recherche, puisque les contraintes d'enseignement-apprentissage sont les mêmes pour les deux technologies (Dalgarno et Lee, 2010; Dunleavy et Dede, 2014), ce qui justifie d'inclure les articles traitant de RA.

En ce qui concerne le volet apprentissage de la chimie, nous avons retenu les mots-clés suivants : « chemistry education » et « enseignement de la chimie ». D'autres variantes seront utilisées, comme « chemistry teaching » et « chemistry learning ».

Pour la durée couverte, comme la RV est une technologie qui a beaucoup évolué dans les dix dernières années, la recension inclura les articles des années 2010 à ce jour. Les articles antérieurs ont peu de chances d'offrir des descriptions comparables à celles des articles après 2010, puisque les environnements de RV n'étaient pas aussi immersifs, du fait qu'ils étaient liés à un ordinateur plutôt qu'un casque ou un téléphone (Klingenberg et al., 2020).

Ces critères d'inclusion permettent de chercher l'ensemble des articles traitant de l'apprentissage de la RV en chimie. Toutefois, ils ne permettent pas de trier les articles qui décrivent des activités et les environnements RV des recensions de littérature ou des articles théoriques. Ce sont donc les critères d'exclusion qui orienteront cette partie du triage des articles.

3. PROCÉDURE DE TRAITEMENT DE DONNÉES

Selon Bardin (2013), le codage est une procédure systématique pour transformer les données brutes d'un texte en indices qu'on peut relier à la théorie du chercheur. Ces indices, appelés unités de sens, doivent être choisis, regroupés et analysés de façon à permettre des inférences cohérentes avec le type de données à sa disposition et l'objectif de recherche (Bardin,

2013). Dans cette optique, une grille d'analyse a été élaborée pour regrouper les éléments d'articles qui peuvent éclairer nos objectifs spécifiques de recherche. Cette grille est présentée dans l'annexe A.

3.1 Première partie- Provenance des écrits

La première partie de cette grille est orientée vers la documentation du type d'articles et des aspects génériques du contexte de l'article (niveau scolaire ciblé, pays où a eu lieu l'activité).

3.2 Deuxième partie- Apprentissages ciblés

La seconde partie de la grille cible les apprentissages souhaités dans l'activité, ce qui est directement lié aux intentions d'apprentissage. La modélisation étant une démarche d'articulation de connaissances de différents registres, la grille a été élaborée pour décortiquer les connaissances mises en jeu et vérifier la correspondance de l'apprentissage visé avec les visées de la modélisation.

Pour ce faire, la première étape est d'identifier les concepts qui sont ciblés dans les activités décrites dans les articles. Ensuite, il faut déterminer avec quels types de savoirs les concepts sont mis en jeu. En effet, la modélisation est une démarche qui utilise et construit des savoirs formels, mais nécessite aussi des savoir-faire et des démarches scientifiques. Quatre catégories ont été formées pour classer les savoirs mis en jeu: les savoirs scientifiques formels, les savoir-faire, des attitudes, et les démarches. Ces savoirs sont décrits dans le chapitre des résultats.

Une fois les savoirs identifiés, la nature de l'apprentissage était décortiquée avec le tétraèdre chimique. Cette analyse a permis d'identifier si l'apprentissage ciblé articulait les

registres de connaissances empiriques, théoriques ou symboliques. Cette étape est décrite dans le chapitre des résultats.

3.3 Troisième partie- Intégration des modèles

La troisième partie est orientée sur la relation entre la RV et l'apprentissage. La présence d'un modèle et son rôle dans l'activité sont également pris en compte dans cette section. De plus, à partir de l'analyse de l'utilisation des modèles dans l'activité, le respect des caractéristiques des modèles scientifiques (hypothétiques, modifiables et contextualisés) a été vérifié.

Pour analyser le rôle du modèle dans l'activité, trois catégories de base ont été créées : les modèles visés comme apprentissage, les modèles comme moyen d'apprentissage et les modèles produits d'activité. Les différences entre ces rôles sont décrites dans le chapitre des résultats. Les rôles des modèles ont été utilisés pour déterminer d'une part si les élèves étaient responsables dans l'utilisation du modèle.

3.4 Quatrième partie-la tâche de représentation

La quatrième section est dédiée à la description des tâches de représentation. Outre l'identification de sa présence dans l'activité, le respect des contraintes de recherche de représentation uniforme et d'analyse de la cohérence interne du modèle.

3.5 Cinquième partie- Contexte de la RV

La cinquième partie est orientée sur la description de l'environnement de RV et de l'activité (contexte de la RV, activités réalisées par les élèves). Cette section permet donc d'identifier comment le contexte de la RV était lié à l'apprentissage.

La première étape dans l'analyse l'environnement de RV était de vérifier la présence d'un contexte empirique. Pour ce faire, les descriptions des environnements et/ou du contexte de l'environnement RV pour les rattacher aux éléments de l'apprentissage expérientiel (scénario, laboratoire, jeu de rôle, etc.) (Dawley et Dede, 2014).

Ensuite, le recours ou non à la problématisation était analysé. En effet, pour que les élèves découvrent ce qui donne sens au modèle, ils doivent faire face à un problème scientifique. La présence d'un tel problème était vérifiée dans le contexte d'activité, par l'entremise des questionnements soumis aux élèves.

Enfin, les contraintes techniques de l'activité et de l'environnement ont été notées. Ces informations étaient aussi utiles pour comprendre la relation entre l'activité de l'élève et l'apprentissage. C'est à partir de cette partie qu'on pouvait déterminer le rôle de la RV dans l'activité. Quatre catégories de fonction d'usage ont été créées : la fonction démonstration, la fonction laboratoire, la fonction modèle manipulable et la fonction jeu. Ces catégories sont décrites dans le chapitre des résultats. Ces fonctions d'usage ont été définies pour illustrer la nature de la relation entre la RV et l'apprentissage.

3.6 Sixième partie – Synthèse

La septième partie sert de synthèse et permet d'évaluer l'intégration globale des contraintes de la modélisation dans l'activité et l'environnement de RV.

QUATRIÈME CHAPITRE. LES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, les résultats de l'analyse documentaire sont présentés. La première section expose des informations générales sur les articles retenus. La seconde section traite des résultats liés aux intentions d'apprentissage des activités analysées. La troisième section traite des caractéristiques du contexte des activités d'apprentissage en lien avec les apprentissages visés par les recherches empiriques. La quatrième section traite des contraintes de ces activités. La cinquième section traite des étayages repérés dans les environnements de RV.

1. DONNÉES DESCRIPTIVES DES ÉCRITS RECENSÉS

Lors de la recension, 119 articles ont été repérés et 39 articles ont été retenus sur la base des critères d'inclusion (voir annexe B).

Le tableau 1 présente les niveaux scolaires qui ont été ciblés dans les recherches retenues.

Tableau 1. Niveaux scolaires ciblés dans les recherches répertoriées

Niveau scolaire	**Nombre d'articles**
Secondaire	16
Universitaire	21
Pas spécifié	2

Le tableau 1 met en lumière que la plupart des recherches ciblaient l'apprentissage à des niveaux universitaires et secondaires, les premiers étant légèrement plus fréquents. Considérant que la plupart des programmes de primaire n'abordent pas les concepts de chimie et le peu de métiers professionnels qui nécessitent une formation en chimie, il est logique que ces niveaux ne soient pas ciblés par les recherches. On peut également noter que le nombre de recherches consacrées à la RV est relativement faible. Cela peut s'expliquer par la nouveauté de ces technologies ainsi que les coûts matériel et méthodologique nécessaires pour mener ce type de recherche.

Le tableau 2 résume les pays d'origine des recherches menées.

Tableau 2. Niveaux scolaires ciblés dans les recherches répertoriées

Système scolaire	**Nombre de recherches**
Allemagne	6
États-Unis	7
Royaume-Uni	1
Chili	1
Chine	4
Hollande	1
Indonésie	6
Jordanie	1

Malaisie	2
Ontario	2
Pakistan	1
Pas spécifié	3
Pologne	1
Suède	2
Taiwan	1

Le tableau 2 montre que les recherches se sont déroulées dans une multitude de pays.

2. ANGLES D'APPROCHES ADOPTÉS DANS LES RECHERCHES UTILISANT LA RV : PORTRAIT GLOBAL

L'analyse des thèmes de recherche ciblés par les études empiriques dans le contexte du recours à la RV montre qu'au-delà de l'étude des effets du recours à la RV sur l'apprentissage des savoirs disciplinaires, une diversité des préoccupations de la recherche dans ce domaine se dégage. Bien que notre étude cible spécifiquement les apprentissages disciplinaires, afin d'avoir une vision systémique des liens que la recherche fait entre l'utilisation de la RV et la classe de chimie, nous avons brossé un portrait global des objets de recherches. Le tableau 3 présente une synthèse sommaire des thèmes de recherche associés à l'utilisation de la RV

Tableau 3. Thèmes adoptés dans les recherches utilisant la RV

Types de recherches	Nombre de recherches
Perception du personnel professionnel utilisateur de la RV (enseignant, expert, etc.)	6
Lien entre l'utilisation par l'élève de la RV et des aspects psychopédagogiques	16
Effet sur les apprentissages disciplinaires	17
Total	39

Le tableau montre que les recherches ont documenté différents effets associés à la RV. On remarque que même si toutes les recherches évoquent des effets potentiels sur les apprentissages des élèves en chimie dans la justification de la recherche, moins de la moitié des recherches ont mesuré les effets réels sur les apprentissages disciplinaires. Ce constat s'explique par les ancrages théoriques des chercheurs et leurs spécialités, mais aussi par le lien théorique que les auteurs cherchent à établir entre la RV et des caractéristiques de la personne qui enseigne ou qui apprend.

Si on met de côté les études sur les apprentissages disciplinaires que nous présenterons en détail plus loin, deux grandes catégories de préoccupations de la recherche se dégagent : 1) étude des perceptions du personnel professionnel utilisateur de la RV; 2) étude des liens entre l'utilisation par l'élève de la RV et des aspects psychopédagogiques.

2.1 Perceptions du personnel professionnel utilisateur de la RV

Six recherches ont porté sur l'appréciation d'enseignants et d'autres professionnels (spécialistes disciplinaires, experts en développement de RV) d'environnements de RV ou de RA destinés à l'enseignement de la chimie. Des enseignants ou des professionnels (de manière individuelle ou en groupe de discussion) devaient estimer la qualité de différents critères des environnements RV (potentiel d'apprentissage, qualité audiovisuelle, qualité du logiciel) (Bakar et al., 2019; Hidayah et al., 2020; Pradani et al., 2020; Ripsam et Nerdel, 2022; Suleman et al., 2019; van Dinther et al., 2023).

Les résultats des recherches montrent que les environnements de RV développés pour les recherches sur l'utilisation de la RV pour l'enseignement de la chimie étaient perçus attrayants (c'est-à-dire que les images, les sons et l'expérience vécue étaient agréables) et propices à l'apprentissage (contenus conformes aux programmes scolaires et à la réalité, clairs et facilitant la réflexion des élèves) (Bakar et al., 2019; Hidayah et al., 2020; Pradani et al., 2020; Ripsam et Nerdel, 2022; Suleman et al., 2019; van Dinther et al., 2023).

Rappelons que ces études rapportent la perception du personnel du potentiel de la RV sur les apprentissages. Ils ne permettent donc pas de mesure de manière directe les effets réels reliant l'utilisation de la RV et l'appropriation par l'élève des caractéristiques des savoirs conceptuels et des démarches en chimie. Nous avons donc écarté ces études de l'analyse en finesse des tâches d'apprentissage disciplinaire.

2.2 Liens entre l'utilisation par l'élève de la RV et des dimensions psychopédagogiques

Comme mentionné plus haut, seize recherches traitaient exclusivement d'aspects psychopédagogiques liés à l'utilisation de la RV ou de la RA pour l'apprentissage de la chimie. Parmi ces aspects, les recherches abordent la motivation, les attitudes d'engagement des élèves (Chiu et al., 2019; Crandall et al., 2015; Krug et Huwer, 2023; Peterson et al., 2020), les perceptions des élèves d'avoir appris en RV (Abdinejad, Ferrag, et al., 2021; Abdinejad, Talaie, et al., 2021; Abuhammad et al., 2021; Bernholt et al., 2019; Frevert et Di Fuccia, 2021; Garcia-Bonete et al., 2019; Iordache, 2021; Pandey et al., 2022; Pietikäinen et al., 2021; Seibert et al., 2020; R. Zhao et al., 2022) et l'impact de la RV sur les résultats académiques des élèves. Il faut noter que six recherches discutant des apprentissages disciplinaires ont également mesuré des facteurs psychopédagogiques, dont cinq séparaient l'analyse des facteurs psychopédagogiques de l'analyse des apprentissages (Brown et al., 2021; Cai et al., 2014; Elford et al., 2022; Habig, 2020; Jagodziński et Wolski, 2015; Merino et al., 2022).

Nous allons présenter les faits saillants des résultats des recherches liés aux dimensions psychopédagogiques.

2.2.1 Des liens entre l'utilisation de la RV et des facteurs motivationnels

Les recherches centrées sur la motivation et les attitudes des élèves ont rapporté que les élèves se sentent intéressés, motivés et réalisent avec plaisir des activités d'apprentissage de la chimie en RV ou en RA (Bernholt et al., 2019; Brown et al., 2021; Cai et al., 2014; Crandall et al., 2015; Habig, 2020; Jagodziński et Wolski, 2015; Krug & Huwer, 2023; Merino et al., 2022;

Peterson et al., 2020). Toutefois, dans l'ensemble des études, une seule recherche a traité de l'effet sur la motivation à long terme (Bernholt et al., 2019). Les auteurs déclarent qu'au bout de plusieurs semaines d'utilisation de la RV, les élèves ne voyaient plus la RV comme un outil d'apprentissage motivant, mais comme un ajout ludique au cours (Bernholt et al., 2019). Notons que le protocole méthodologique présenté dans l'article ne nous a pas permis de voir comment les auteurs ont procédé à la mesure de la variation de l'intérêt. L'ensemble de ces résultats indiquent que les élèves sont intéressés à court terme par les activités en RV, mais les impacts sur la motivation à long terme ne sont pas suffisamment documentés. De plus, une recherche a vérifié s'il y avait une corrélation entre le sentiment de plaisir et les résultats des élèves aux questionnaires post-test sur les contenus appris, mais n'a pas trouvé de corrélation significative (Elford et al., 2022).

2.2.2 Des liens entre l'utilisation de la RV et la perception de mieux apprendre

En ce qui concerne les perceptions d'apprentissage, plusieurs recherches indiquent que les élèves ont l'impression que la RV les aide à améliorer leurs aptitudes de visualisation spatiale (Abdinejad, Ferrag, et al., 2021; Abdinejad, Abuhammad et al., 2021). Toutefois, les résultats des mesures empiriques des aptitudes de visualisation spatiale sont contradictoires et contredisent dans une certaine mesure les perceptions des élèves (voir section 2.2).

D'autres recherches rapportent que les élèves déclarent mieux comprendre les contenus qui sont enseignés avec la RV ou la RA qu'avec l'enseignement magistral (Frevert et Di Fuccia, 2021; Garcia-Bonete et al., 2019; Pandey et al., 2022; Seibert, Marquardt, et al., 2020). L'étude de Zhao et al. (2022) qui a comparé deux environnements de RV indique toutefois que ces perceptions dépendent du degré d'explicitation des contenus pour chacun des environnements. En effet, les

étudiants questionnés avaient systématiquement de moins bonnes perceptions pour l'environnement dont les instructions et les interactions chimiques n'étaient pas présentées clairement, contrairement à l'autre (R. Zhao et al., 2022).

2.2.3 Des liens entre l'utilisation de la RV et les résultats académiques des élèves

Miller et al. (2021) ont comparé les résultats académiques d'étudiants ayant participé à un cours mobilisant la RV pour visualiser des molécules organiques et ceux d'élèves n'ayant pas suivi ce cours. Leurs résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative dans les notes des élèves selon leur ethnie, leurs moyennes académiques ou leur genre. Toutefois, les étudiants qui étaient les premiers de leur famille à réaliser des études universitaires qui avaient participé au cours avec la RV des résultats académiques significativement supérieurs à ceux du groupe témoin après le cours.

2.3 En synthèse

Certes la motivation et les attitudes affectent positivement l'apprentissage, toutefois, les perceptions positives des élèves ne peuvent pas être utilisées comme des faits inférant la maîtrise conceptuelle des savoirs de la chimie. Bien que les processus cognitif et affectif soient liés, ils renvoient à des mécanismes différents dont l'un ne peut se substituer à l'autre. Autrement dit, les recherches discutant strictement des aspects psychopédagogiques ne peuvent pas servir pour l'analyse des liens entre l'utilisation de la RV et les conditions d'appropriation du processus de modélisation en chimie. En conséquence, ces recherches ont été également mises de côté pour la suite des analyses.

3. LIENS ENTRE L'USAGE DE LA RV ET L'APPRENTISSAGE DES SAVOIRS DISCIPLINAIRES EN CHIMIE

Seize recherches ont porté sur l'apprentissage de contenus disciplinaires en chimie associé à l'utilisation de la RV. Les méthodologies utilisées reposent principalement sur l'administration à des étudiants de questionnaires prétest et post-test. L'objectif est de mesurer l'évolution des connaissances des apprenants concernant des savoirs en chimie. Dans une recherche, ce sont les productions écrites des apprenants qui ont été analysées.

Afin de faciliter la présentation des résultats rapportés, nous les avons regroupées en différentes catégories qui déclinent les différentes composantes des savoirs en chimie du point de vue théorique et empirique. Notre objectif est de mettre en évidence les atouts de la RV relativement aux spécificités des savoirs en chimie.

3.1 Les apprentissages liés aux structures moléculaires

Six études ont vérifié s'il y avait une relation entre les aptitudes de visualisation spatiale et l'apprentissage de structures moléculaires (Brown et al., 2021; Elford et al., 2022; Habig, 2020; Ling et al., 2021). Elford et al. (2022) n'ont pas trouvé de relation significative entre les résultats prétest des questionnaires d'aptitudes de visualisation spatiale et l'amélioration de la compréhension de la théorie VSEPR (Elford et al., 2022). Brown et al. (2021) n'ont pas trouvé de corrélation entre les aptitudes de visualisation spatiale et l'apprentissage des structures atomiques, avec la RV, ni d'ailleurs pour les groupes témoins. Ces résultats concordent avec ceux de Ling et al. (2021), qui ont comparé les résultats d'élèves à des questionnaires prétest et post-test sur les

structures moléculaires en fonction des aptitudes de visualisation spatiale, des connaissances préalables, de l'attitude envers les sciences et de l'utilisation de la RA en classe. Leurs résultats indiquaient que les élèves pouvaient mieux comprendre les structures moléculaires sans avoir au préalable de bonnes aptitudes de visualisation spatiale, s'ils avaient de bonnes connaissances initiales en chimie (Ling et al., 2021). Les élèves qui n'avaient pas de bonnes connaissances initiales en chimie avaient toutefois besoin de bonnes capacités de visualisation spatiale et l'utilisation de la RA pour apprendre à court terme et à long terme sur les structures moléculaires (Ling et al., 2021). Toutefois, Habig (2020) a observé une corrélation significative entre l'apprentissage de l'identification des formules moléculaires et les capacités de visualisation spatiale des hommes (pas des femmes).

Dans l'ensemble, les résultats des recherches sur l'apprentissage des structures moléculaires illustrent que la RV est utilisée pour donner une image concrète aux concepts abstraits de structures moléculaires, ce qui est une application du principe de concrétisation de la théorie de l'apprentissage cognitif multimédia (Mayer, 2014). En permettant aux élèves de voir les molécules plutôt que de les imaginer, la RV permettrait aux élèves de se concentrer sur l'analyse du modèle. Dans cette perspective, il est logique que les élèves n'ayant pas de bonnes aptitudes de visualisation spatiale ne soient pas désavantagés dans l'apprentissage des structures moléculaires.

Deux recherches ont aussi vérifié si la RV avait un impact sur l'apprentissage de la visualisation spatiale elle-même. Kuit et Osman (2021) ont observé que les élèves ayant utilisé la RV pour apprendre les concepts liés aux structures moléculaires avaient de meilleures aptitudes de visualisation spatiale que le groupe témoin après avoir réalisé l'activité. Elford et al. (2022) ont

quant à eux observé que les élèves ayant réalisé une activité ludique d'apprentissage des structures moléculaires et ceux ayant réalisé la même activité avec la RA avaient amélioré leurs aptitudes de visualisation spatiale, sans qu'il y ait de différence significative entre les deux groupes. Ces résultats contradictoires indiquent à tout le moins que la RV ne nuit pas à l'apprentissage de la visualisation spatiale.

Keller et al. (2021) ont mesuré l'impact d'une application de RA sur la compréhension de la stéréochimie, de la chimie carbonylique et de la chimie péricyclique en comparant les résultats d'étudiants ayant utilisant la RA ou non à des questionnaires prétest et post-test sur leurs connaissances en chimie. Les résultats bruts des prétest et post-test n'étaient pas présentés, seulement les corrélations les résultats prétest et post-test, les aptitudes de visualisation spatiale et les perceptions de charge cognitive. Par ailleurs, Keller et al. (2021) n'ont pas trouvé de corrélation significative entre les résultats des prétests aux questionnaires des connaissances sur la stéréochimie, la chimie carbonylique et péricyclique des élèves ayant utilisé la RA et les résultats post-test aux mêmes questionnaires, alors qu'ils en ont trouvé pour le groupe témoin. Ces résultats indiquent que la RA, en permettant aux élèves de concentrer leur attention sur moins d'informations, a entraîné les élèves ayant moins de connaissances de départ à apprendre davantage, réduisant l'effet des connaissances préalables sur les résultats finaux (Keller et al., 2021). Ces résultats concordent avec ceux de Ling et al. (2021) comme quoi les élèves ne disposant pas de bonnes connaissances initiales en chimie pouvaient mieux comprendre les structures moléculaires grâce à la RA et de bonnes aptitudes de visualisation spatiale que les élèves qui n'ont pas utilisé la RA.

L'impact de la RV sur l'apprentissage des structures moléculaires et protéiques a été mesuré dans neuf recherches. Abbasi et al. (2023), Ling et al. (2021), Brown et al. (2021) et Habig (2020) ont mesuré l'impact de cours magistraux assistés par la RV sur les structures protéiques et moléculaires en comparant les résultats des apprenants aux questionnaires prétest et post-test sur leurs connaissances liées aux contenus enseignés. Dans ces quatre études, une comparaison avec au moins un groupe témoin était également réalisée. Elford et al. (2022) ont quant à eux réalisé un cours magistral sur la théorie VSEPR avec la RA suivi d'une activité ludique. Les résultats d'Abbasi et al. (2023) ont mis en lumière que les apprenants ayant utilisé la RA reconnaissaient mieux les différentes structures des enzymes étudiées, et ceux de Ling et al. (2021) que les élèves ayant utilisé la RA comprenaient mieux les structures chimiques que les élèves qui ne l'avaient pas utilisée. Toutefois, Brown et al. (2021) n'ont pas mesuré de différence significative entre le groupe ayant utilisé la RV, la simulation et les modèles physiques, les trois groupes ayant amélioré significativement leur compréhension des liaisons moléculaires. De même, Elford et al. (2022) n'ont pas mesuré de différence significative de l'apprentissage de la théorie VSEPR entre le groupe ayant réalisé l'activité ludique en RA et celui sans la RA, excepté pour la compréhension de la géométrie moléculaire. Ces résultats indiquaient que les apprentissages de l'identification des espèces chimiques et des angles de liaisons (au centre de la théorie VSEPR) étaient liés à l'activité ludique plutôt qu'à la RA (Elford et al., 2022). Habig (2020) n'a pas non plus mesuré de différence significative de la compréhension des structures moléculaires entre le groupe témoin et le groupe ayant utilisé la RV (excepté pour les hommes).

Les contradictions entre les résultats de recherche mettent en lumière que l'aspect concret des structures moléculaires en RV n'est pas toujours suffisant pour améliorer les apprentissages

des élèves, puisque des activités semblables sans RV peuvent arriver aux mêmes apprentissages. Ainsi, ces résultats montrent que la façon avec laquelle l'élève interagit avec les savoirs est peut-être aussi, voir plus importante que la façon de présenter le savoir.

Dans les cas de Cai et al. (2014) et de Kuit et Osman (2021), les cours mobilisaient la pédagogie par enquête avec la RA ou la RV et ciblaient l'apprentissage des structures moléculaires. Dans cette perspective, les élèves devaient manipuler les structures moléculaires pour déduire certaines règles sur les liaisons chimiques (Cai et al., 2014). Les résultats des deux recherches mettent en lumière que les élèves comprenaient mieux les liaisons moléculaires après l'activité en RV ou en RA (Cai et al., 2014; Kuit et Osman, 2021). Dans le cas de Kuit et Osman (2021), les élèves ayant utilisé la RV comprenaient également mieux que les élèves du groupe témoin, ce qui ne pouvait pas être le cas de Cai et al. (2014), qui n'ont pas effectué cette comparaison. Ces résultats illustrent le principe de la découverte guidée, c'est-à-dire qu'avec un accompagnement adéquat, les élèves apprennent mieux en manipulant eux-mêmes le savoir que par les démonstrations magistrales (Mayer, 2014). Ce principe étant comparable à la prise en charge par l'élève de la modélisation, ces recherches indiquent que la RV peut être utilisée pour amener l'élève à analyser un modèle.

Astuti et al. (2020) ont quant à eux comparé les résultats d'élèves ayant réalisé un laboratoire en RV et ceux de deux groupes ayant réalisé un laboratoire réel à des questionnaires sur les liaisons chimiques. Leurs résultats indiquent que les élèves ayant réalisé le laboratoire en RV comprenaient mieux les structures moléculaires que les élèves n'ayant pas réalisé le laboratoire RV (Astuti et al., 2020).

Wulandari et al. (2019) ont vérifié si les étudiants d'un cours sur les structures chimiques utilisant la RA représentaient de façon appropriée les molécules projetées en analysant les productions écrites des étudiants. Leurs résultats indiquent que les étudiants représentent adéquatement les molécules, que ce soit en termes d'angles de liaisons, de structures de Lewis ou des domaines liants et non-liants d'une molécule. Étant donné que les étudiants étaient en deuxième année dans un parcours universitaire en chimie (Wulandari et al., 2019), l'absence de vérification des connaissances initiales des élèves limite la portée des résultats quant à l'impact de la RA sur l'apprentissage.

3.2 Les apprentissages liés à la modélisation des interactions chimiques

Trois recherches ont vérifié l'impact de la RV sur l'apprentissage de la neutralisation acidobasique. Johnson-Glenberg et al. (2014) ont réalisé une activité avec la RA dans laquelle des élèves pouvaient ajouter des molécules d'acides et de base dans une flasque virtuelle et voir l'impact de ces ajouts sur le pH. Les résultats à des questionnaires prétest, en activité, et post-test d'élèves réalisant l'activité en RA avant un cours magistral et d'élèves recevant le cours magistral avant l'activité avec la RA ont été comparés (Johnson-Glenberg et al., 2014). Peeters et al. (2023) ont fait réaliser deux expériences réelles de neutralisation acidobasique dans lesquelles les élèves utilisaient la RA pour visualiser les interactions moléculaires, qu'ils devaient ensuite expliquer à des pairs. Les résultats des questionnaires prétest et post-test des élèves ayant réalisé les expériences en RA étaient comparés à ceux d'élèves réalisant les mêmes activités en recevant des explications par des animations ou des vidéos après l'expérience. Les résultats de Johnson-Glenberg et al. (2014) mettent en évidence que les deux groupes d'élèves comprenaient mieux les

interactions chimiques après les deux activités et qu'il n'y avait pas de différence significative entre les résultats prétest et post-test des deux groupes. Toutefois, il y avait des différences significatives entre les résultats en activité des deux groupes, le groupe utilisant la RA ayant progressé davantage que le groupe ayant suivi le cours magistral (Johnson-Glenberg et al., 2014). À l'inverse, les résultats de Peeters et al. (2023) indiquaient que les élèves ayant réalisé les expériences avec la RA comprenaient moins bien les acides, les bases et la neutralisation que les élèves n'ayant pas utilisé la RA, les résultats post-test des élèves ayant utilisé la RA étant significativement moins élevés que ceux des groupes sans RA (Peeters et al., 2023).

Dans les deux études, les élèves devaient articuler les concepts d'acides, de bases, d'ions et de pH avec le contexte d'expérience (réelle dans un cas et virtuelle dans l'autre), par l'explication verbale à des pairs dans le cas de Peeters et al. (2023) et par la visualisation du modèle dans le cas de Jonhson-Glenberg et al. (2014). Toutefois, alors que dans les expériences de Peeters et al. (2023), les élèves devaient articuler les concepts à une expérience empirique et un modèle, l'activité de Johnson-Glenberg et al. (2014) ne mettait pas les élèves en contact avec une expérience empirique, seulement avec un modèle visible de la réaction de neutralisation. Les expériences de Peeters et al. (2023) combinaient donc au même moment la phénoménographie et la phénoménologie, soit la description du phénomène à partir d'observations empiriques et sa description à partir de concepts. De plus, le modèle était imposé aux élèves, car la RV projetait un modèle que les élèves ne contrôlaient pas. Dans les activités de Jonhson-Glenberg et al. (2014), les élèves manipulaient le modèle d'abord pour analyser et décrire comment les acides et les bases interagissent pour déduire les règles du modèle et ensuite les appliquer dans d'autres situations. Les élèves avaient donc un certain contrôle et une autonomie dans l'interprétation de la

neutralisation et les étapes de description phénoménographique étaient séparées des étapes de description phénoménologique. Les différences entre les résultats d'élèves qui avaient l'occasion de manipuler le modèle et ceux qui ne le pouvaient pas illustrent à nouveau que les élèves apprennent mieux lorsqu'ils peuvent élaborer leurs propres réflexions, ce qui met en évidence le principe de la découverte guidée et de la prise en charge par l'élève de la modélisation. Les différences montrent aussi que la concrétisation du modèle a moins d'impact sur les apprentissages des élèves que l'exploration du modèle, ce qui avait été souligné par les différences dans les résultats des recherches sur l'apprentissage des structures moléculaires.

Les résultats de Peeters et al. (2023) mettent aussi en lumière l'importance de séparer les descriptions phénoménographiques et phénoménologiques, puisque les élèves ayant reçu l'explication du modèle après l'expérience ont mieux compris les relations entre le modèle de neutralisation et l'expérience réalisée. Ces résultats mettent en lumière que le remplacement du référent empirique par le modèle ne prend sens qu'une fois l'expérience réalisée, puisque le problème qui justifie l'utilisation du modèle ne peut être compris d'avance (Chomat et al., 1992).

Jagodziński et Wolski (2015) ont comparé les résultats d'élèves ayant réalisé un laboratoire en RV et ceux ayant réalisé un laboratoire réel à des questionnaires prétest, post-test à court terme et à long terme sur la compréhension de la neutralisation acidobasique. Les élèves réalisant les laboratoires virtuels ont reçu au préalable des instructions d'enseignants, de vidéos ou écrites, alors que les élèves du groupe témoin avaient reçu des instructions vidéo et écrites. Leurs résultats indiquent que les élèves ayant réalisé les laboratoires virtuels maîtrisaient davantage les calculs liés à la neutralisation acidobasique et comprenaient mieux comment élaborer une expérience que

les élèves du groupe témoin, peu importe le type d'instructions reçu, puisque des différences significatives entre les gains d'apprentissage ont été mesurées à court terme et à long terme (Jagodziński et Wolski, 2015). Étant donné que la seule différence entre les laboratoires virtuels et réels était le type d'instructions, qui ne sont liées ni à l'ancrage ni au processus de modélisation, ces résultats ne peuvent être articulés à une différence du processus d'apprentissage. La différence s'explique par le plus grand sentiment d'efficacité pour les élèves ayant réalisé le laboratoire virtuel et par le fait que les instructions vidéo et des enseignants semblent être mieux comprises par les élèves (Jagodziński et Wolski, 2015).

Hu-Au et Okita (2021) ont mesuré l'impact d'un laboratoire en RV en comparant les résultats d'élèves ayant réalisé un laboratoire réel ou en RV à des questionnaires prétest et post-test sur la différence entre les transformations chimiques et physiques et la sécurité en laboratoire. Les élèves devaient suivre le protocole déjà établi du laboratoire, qui reproduisait la réalité matérielle sans altération. Leurs résultats montrent que les élèves du laboratoire en RV ne différenciaient pas mieux les transformations physiques et chimiques après le laboratoire, les résultats prétest et post-test des n'étant pas significativement différents du groupe témoin, lequel n'a pas progressé de façon significative. En ce qui concerne la sécurité en laboratoire, les élèves du laboratoire en RV ont mieux répondu aux questions de connaissances sur la sécurité au prétest que ceux du groupe témoin, mais ont adopté un comportement moins sécuritaire dans le laboratoire (Hu-Au et Okita, 2021).

Ces résultats contredisent ceux de Jagodziński et Wolski (2015) concernant le meilleur apprentissage dans les mêmes conditions. L'absence d'apprentissage du contenu du laboratoire

illustre que la reproduction en RV d'un contexte réel ne permet pas en soi aux élèves de mieux apprendre. De plus, les résultats mettent en exergue qu'en imposant l'expérience aux élèves, ils ne prennent pas en charge l'interprétation de l'expérience. À l'inverse des résultats de Johnson-Glenberg et al. et Cai et al., où les élèves devaient utiliser l'expérience pour élaborer les modèles et pouvaient exercer un contrôle sur l'expérience, l'absence d'apprentissage dans une expérience où l'élève n'a pas de contrôle et n'est pas responsable de l'élaboration d'un modèle expose l'importance de la prise en charge par l'élève de l'interprétation du laboratoire pour l'apprentissage des concepts en chimie.

Chao et al. (2016) ont comparé les résultats à des questionnaires prétest et post-test sur la compréhension des lois des gaz parfaits d'élèves ayant réalisé un laboratoire réel accompagné d'activités articulant les observations aux modèles des lois des gaz parfaits avec la RV et d'élèves ayant réalisé des laboratoires réels sans RV accompagnés d'un enseignement mathématique des lois des gaz parfaits. Dans les activités impliquant la RV, les élèves étaient appelés à interpréter les modèles des lois des gaz parfaits (dont une base était explicitée) en dessinant l'effet de différentes variables (température, pression, nombre de molécules) sur le comportement des molécules gazeuses, en comparant leurs dessins aux simulations transmises dans la RV, en établissant des relations entre les différentes variables jusqu'à élaborer des protocoles pour déterminer l'effet d'une variable sur une autre (Chao et al., 2016). Ce processus amène les élèves à représenter les concepts, à les articuler aux expériences empiriques et même élaborer une démarche pour valider une hypothèse, ce qui illustre que les élèves étaient responsables de l'utilisation et de l'élaboration du modèle pour expliquer un phénomène. Cette démarche représentait le passage d'une description phénoménographique à une description

phénoménologique. Dans l'autre groupe, les élèves devaient répondre à des questions des enseignants sur des situations quotidiennes en utilisant les équations des lois des gaz parfaits pour y répondre et éventuellement les intégrer dans un laboratoire (Chao et al., 2016). L'articulation entre l'expérience et le modèle ne nécessitait donc pas la traduction du modèle par une représentation des interactions moléculaires.

La comparaison des résultats des deux groupes aux questionnaires indique que les deux groupes avaient appris autant l'un que l'autre sur les relations entre les différentes variables des lois des gaz parfaits, puisqu'il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes pour la plupart des questions, alors qu'il y avait une amélioration significative des bonnes réponses des deux groupes (Chao et al., 2016). Par contre, les élèves ayant réalisé le laboratoire assisté par la RV réussissaient davantage les questions nécessitant des explications des interactions moléculaires (Chao et al., 2016). Ces résultats mettent en lumière que la démarche de représentation du modèle soutient les élèves dans la compréhension du fonctionnement du modèle et de son articulation avec les expériences empiriques. De plus, ces résultats mettent en exergue que l'utilisation de la RV pour concrétiser le modèle et soutenir les élèves dans la représentation des concepts, à la base des principes d'apprentissage génératif et du principe de concrétisation, améliore les apprentissages des élèves.

Merino et al. (2022) ont évalué l'impact d'une application de RA sur l'apprentissage de la chromatographie en analysant l'évolution des représentations du processus de chromatographie et des concepts qui y sont liés dans les documents produits par les étudiants. Les étudiants avaient accès grâce à la RA à des représentations de différents concepts illustrant la séparation de

molécules et devaient répondre à des problèmes scientifiques en articulant les concepts présentés à la séparation des molécules d'un mélange dans la chromatographie. La méthode d'analyse distinguait quatre niveaux de représentation, allant de la description exclusive des observations visibles des expériences à l'utilisation cohérente de représentations algébriques et de concepts pour représenter la séparation des molécules dans l'expérience (Merino et al., 2022). Les résultats des étudiants mettent en lumière une évolution progressive d'une moitié du groupe, dont une faible proportion est passée du premier niveau de description au dernier, alors qu'une autre moitié du groupe a utilisé des descriptions des observations visibles tout au long des activités (Merino et al., 2022).

À la différence des activités réalisées par Chao et al. (2016), les étudiants avaient accès à des données convoquées dans une seule activité, les autres demandant aux élèves de faire des prédictions sur des bases théoriques seulement. Les étudiants étaient donc appelés à représenter un phénomène qu'ils n'avaient pas observé ou manipulé eux-mêmes à partir des concepts à apprendre, ce qui représente une description phénoménologique sans passage par la phénoménographie. Le fait qu'une moitié du groupe ait tenté de représenter des observations empiriques alors que les concepts n'étaient pas présentés à partir de ce genre d'observations illustre que pour articuler des concepts, il faut être capable de l'articuler au phénomène qu'il représente.

Wu et al. (2022) ont mesuré l'impact d'un laboratoire en RV sur l'apprentissage de la production industrielle de diméthyléther (DME) en comparant les résultats d'étudiants à des questionnaires prétest et post-test sur la production de DME. Leurs résultats mettent en lumière que les étudiants comprenaient mieux les concepts liés à la distillation de DME, en plus d'une

amélioration plus marquée de leur compréhension des procédures d'opération des distillateurs (Wu et al., 2022). Par contre, il n'y a pas eu d'analyses statistiques pour vérifier si les différences étaient significatives. Ces résultats mettent en lumière que l'ancrage de l'apprentissage dans une situation concrète dans laquelle les étudiants analysent les conséquences observables de leurs actions leur permet d'articuler les concepts aux expériences vécues, ce qui correspond au principe de l'apprentissage par le contexte (Dawley et Dede, 2014).

3.3 En synthèse

En synthèse, les recherches sur les apprentissages disciplinaires en RV n'exposent pas de différences marquées entre les apprentissages réalisés en RV et les apprentissages réalisés dans la réalité. Par exemple, la reproduction des laboratoires scolaires en RV a amené les élèves à mieux comprendre le laboratoire et les concepts dans les cas de Jagodzinsiki et Wolski et Wu et al., mais pas dans le cas de Hu-Au et Okita.

De même, les recherches sur l'utilisation de la RV pour projeter des structures moléculaires dans un cours magistral ne permettent pas d'établir un impact décisif de la RV sur l'apprentissage des structures moléculaires. En effet, les résultats d'Abbasi et al., de Ling et al. et de Wulandari (qui montrent un apprentissage des structures moléculaires) contredisent ceux de Brown et al., d'Elford et al. et de Habig (qui n'ont pas mesuré une différence significative d'apprentissage entre un groupe utilisant la RV et un groupe témoin). Ces différents résultats mettent en lumière que l'utilisation de la RV pour donner un aspect concret aux concepts abstraits ou aux objets invisibles ne facilite pas en soi l'apprentissage des modèles en chimie.

Toutefois, la plupart des recherches qui intégraient la RV avec une méthode d'apprentissage où l'apprenant appréhendait par lui-même la découverte du savoir (Cai et al., 2014; Chao et al., 2016; Johnson-Glenberg et al., 2014; Kuit et Osman, 2021; Wu et al., 2022) ont exposé que des apprentissages avaient eu lieu (à l'exception des résultats de Peeters et al. (2023)). Dans la même veine, les résultats de Kuit et Osman (apprentissage par enquête) ont mesuré une amélioration de la visualisation spatiale pour le groupe apprenant avec la RV par rapport au groupe témoin, alors qu'Elford et al. (2022) (enseignement magistral et activité ludique) n'en ont pas mesuré. Cette tendance illustre que la prise en charge par l'apprenant du processus de modélisation a peut-être plus d'impact sur l'apprentissage que la présentation d'une manifestation concrète des concepts étudiés.

4. L'ARTICULATION DIDACTIQUE ENTRE L'ENVIRONNEMENT EN RV ET LA STRUCTURE DE LA TÂCHE D'APPRENTISSAGE EN CHIMIE

Afin de comprendre finement comment les élèves interagissent avec la RV, nous avons analysé comment l'environnement technique et didactique est utilisé par l'élève lors de l'exécution de la tâche d'apprentissage proposée. L'analyse nous a permis de dégager quatre catégories de fonctions que nous appelons fonctions d'usage: fonction-laboratoire, fonction modèle manipulable, fonction démonstrative et fonction de jeu. Avant de présenter les résultats, nous allons illustrer chaque catégorie par un exemple concret.

La fonction-laboratoire offre un environnement de RV où les apprenants réalisent des expériences, à l'instar d'un laboratoire réel. Par exemple, Jagodziński et Wolski (2015) ont créé un laboratoire virtuel dans lequel les élèves réalisaient une réaction de neutralisation. Dans ce cas,

la RV sert de source de données, une sorte de substitut de la réalité (au même titre qu'un laboratoire réel), puisque l'élève peut apprendre en analysant les conséquences de ses actions sur le phénomène scientifique en jeu.

La fonction démonstration offre un environnement où l'élève reçoit des informations, mais ne peut les manipuler. L'environnement d'Abbasi et al. (2023), où la RV projette des structures d'enzymes que les élèves pouvaient seulement observer, est un exemple de ce type d'environnement. Dans ces environnements, la RV sert à donner une illustration concrète de concepts ou d'entités invisibles, mettant en pratique le principe de concrétisation de la théorie de l'apprentissage cognitif multimédia (Mayer, 2014).

La fonction modèle manipulable présente un modèle simulé, mais offre l'opportunité à l'élève de modifier différentes variables composant le modèle. Par exemple, Johnson-Glenberg et al. (2014) a utilisé un environnement où les élèves voient des ions d'acides et de bases, peuvent en rajouter et observer le changement de pH, etc. Ce type d'environnement RV combine l'ancrage des concepts abstraits dans une image concrète et la mise à la disposition d'une source de données, puisque l'élève peut apprendre en analysant les conséquences de ses manipulations du modèle, en référence à l'apprentissage par le contexte (Dawley et Dede, 2014; Mayer, 2014).

Enfin, la fonction-jeu est un contexte ludique. À titre d'exemple, Elford et al. ont plongé avec la RA des étudiants dans un labyrinthe fictif, dont ils pouvaient sortir en résolvant des énigmes impliquant les structures moléculaires. Ce genre d'environnement n'offre ni une image concrète d'un concept abstrait, ni une source de données à analyser, mais un contexte ludique, ce

qui justifie leur appellation « jeu ». Les proportions des différents rôles de RV sont présentées dans la figure 4.

4.1 Les fonctions d'usage de la RV

La figure 3 présente la répartition des fonctions d'usage des environnements de RV décrits dans les recherches.

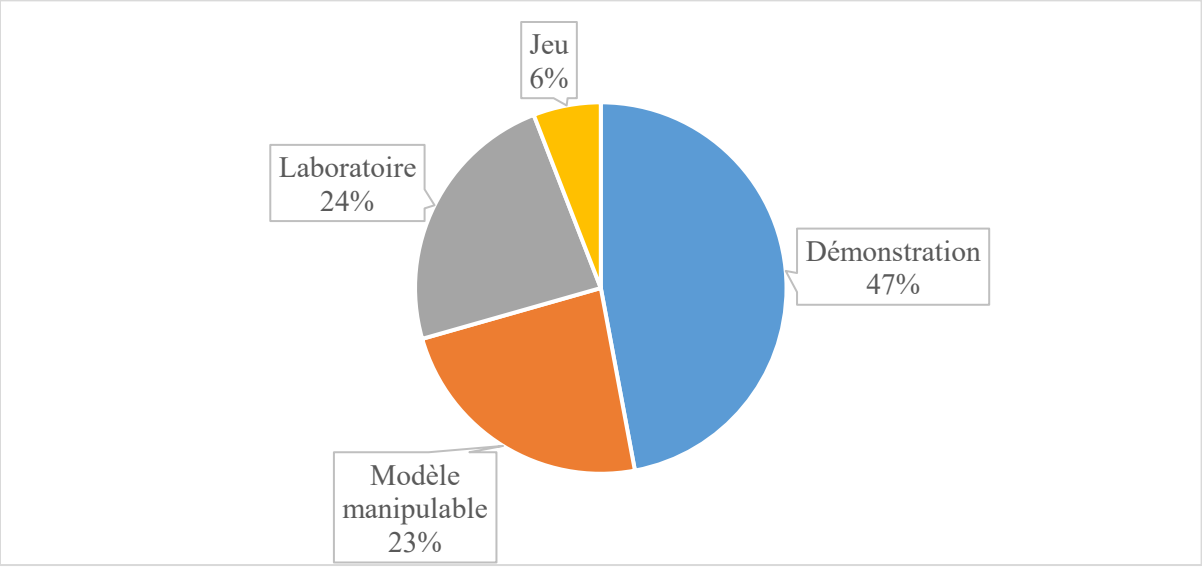


Figure 3. Proportions des différents rôles de RV dans les activités

Plus de la moitié des recherches utilisent la RV comme démonstrations. Cela met en lumière que les recherches sur l'apprentissage avec la RV se sont centrées sur l'application du principe de concrétisation de la théorie de l'apprentissage cognitif multimédia, soit d'illustrer l'apprentissage de concepts abstraits avec des images concrètes. L'utilisation de la RV comme source de données, que ce soit par la manipulation de modèles reflétant des concepts abstraits ou la réalisation de laboratoire, apparaît dans peu de recherches. Cette différence met en exergue que

les recherches sur l'enseignement-apprentissage avec la RV l'ont utilisé davantage pour simplifier le raisonnement de l'élève que pour l'amener à analyser les conséquences de ces actions. Ainsi, les rôles attribués à la RV indiquent que ces dernières sont utilisées de façon plus cohérente avec l'enseignement magistral que pour la modélisation.

La faible proportion de la fonction-jeu montre que la plupart des recherches sur les apprentissages disciplinaires en chimie avec la RV l'ont utilisé pour faciliter l'apprentissage plutôt que comme outil de ludification.

4.2 L'environnement expérimental : la place et l'usage des données scientifiques

Dans la section précédente, l'utilisation de la RV dans les recherches comme une source de données pour l'apprentissage a été mentionnée. Toutefois, cette description est insuffisante pour déterminer si les apprentissages des élèves étaient articulés à une expérimentation scientifique. En effet, un modèle manipulable en RV pouvait illustrer un concept théorique d'un phénomène sans être relié à une situation réelle. À l'inverse, l'observation d'une illustration concrète d'un concept pouvait être utilisée conjointement avec une expérience dans un laboratoire réel. Ainsi, la caractérisation des interactions entre la RV et les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie en RV n'articulaient pas les interactions en RV à une expérience empirique.

Pour distinguer les recherches articulant l'apprentissage en RV à une expérimentation des recherches se centrant sur un apprentissage décontextualisé, il était nécessaire de vérifier si les élèves réalisaient une expérimentation avec la RV. Une expérimentation est définie comme une situation qui met en jeu l'analyse de données issues d'un phénomène réel, à l'instar d'un

laboratoire. La figure 4 présente les proportions des recherches recensées qui mobilisaient une expérimentation scientifique.

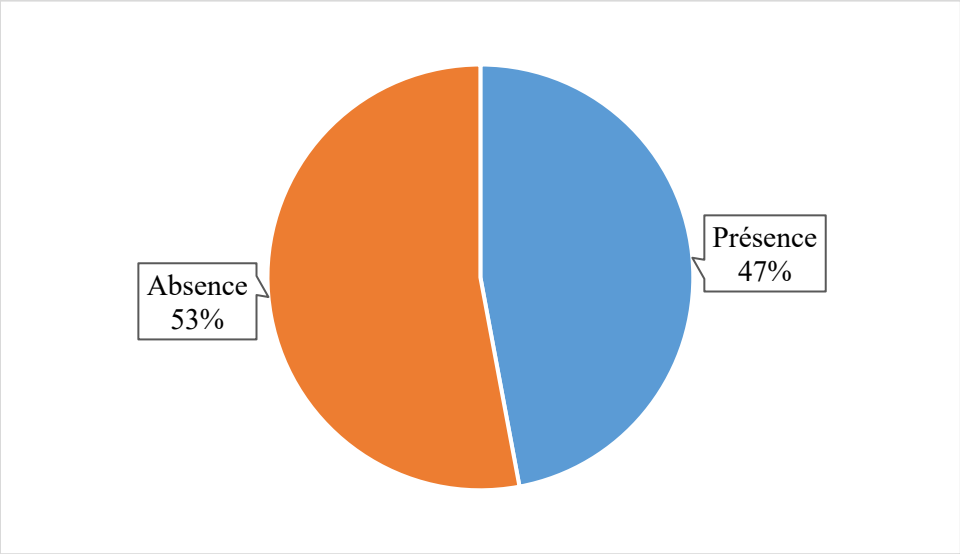


Figure 4. Proportions d'activités impliquant une expérimentation

La figure 4 montre qu'une majorité des recherches sur les apprentissages disciplinaires avec l'enseignement de la RV en chimie ne demandaient pas à l'élève de manipuler des données. Ce constat expose que le principe d'ancrage, soit que les élèves apprennent mieux les nouveaux concepts lorsqu'ils sont liés à des situations concrètes, a été moins appliqué que le principe de concrétisation. En conséquence, les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie avec la RV se sont centrées sur l'enseignement magistral avec la RV plutôt que l'utilisation de la RV comme source de données pour que les élèves analysent les conséquences de leurs actions. De prime abord, les recherches sur l'enseignement de la chimie avec la RV n'ont pas intégré les contraintes de la modélisation à même la RV.

5. LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION ET L'ENVIRONNEMENT DE RV : NATURE DES APPRENTISSAGES MIS EN JEU

Pour établir la manière dont la démarche de modélisation est spécifiquement traitée, il faut prendre en compte le type de savoirs mobilisés dans les activités (savoirs formels, savoir-faire), qui peuvent éclairer comment l'apprentissage du concept est structuré dans l'activité. La modélisation étant une démarche d'articulation entre une expérience et des idées abstraites, plusieurs types de savoirs doivent y être mobilisés. De plus, la nature des connaissances en jeu est importante pour déterminer si les savoirs mobilisés articulent effectivement des connaissances relevant d'observations empiriques et d'idées abstraites. Les prochaines sections détaillent comment les apprentissages visés dans les recherches retenues s'arrimaient aux visées de la modélisation.

5.1 Thèmes scientifiques associés à la modélisation

Une première étape pour répondre au premier objectif est d'identifier les thèmes ciblés dans les activités. Six thèmes ont été identifiés. La figure 5 présente le nombre de recherches mesurant l'impact de la RV sur l'apprentissage de chaque thème d'apprentissage.

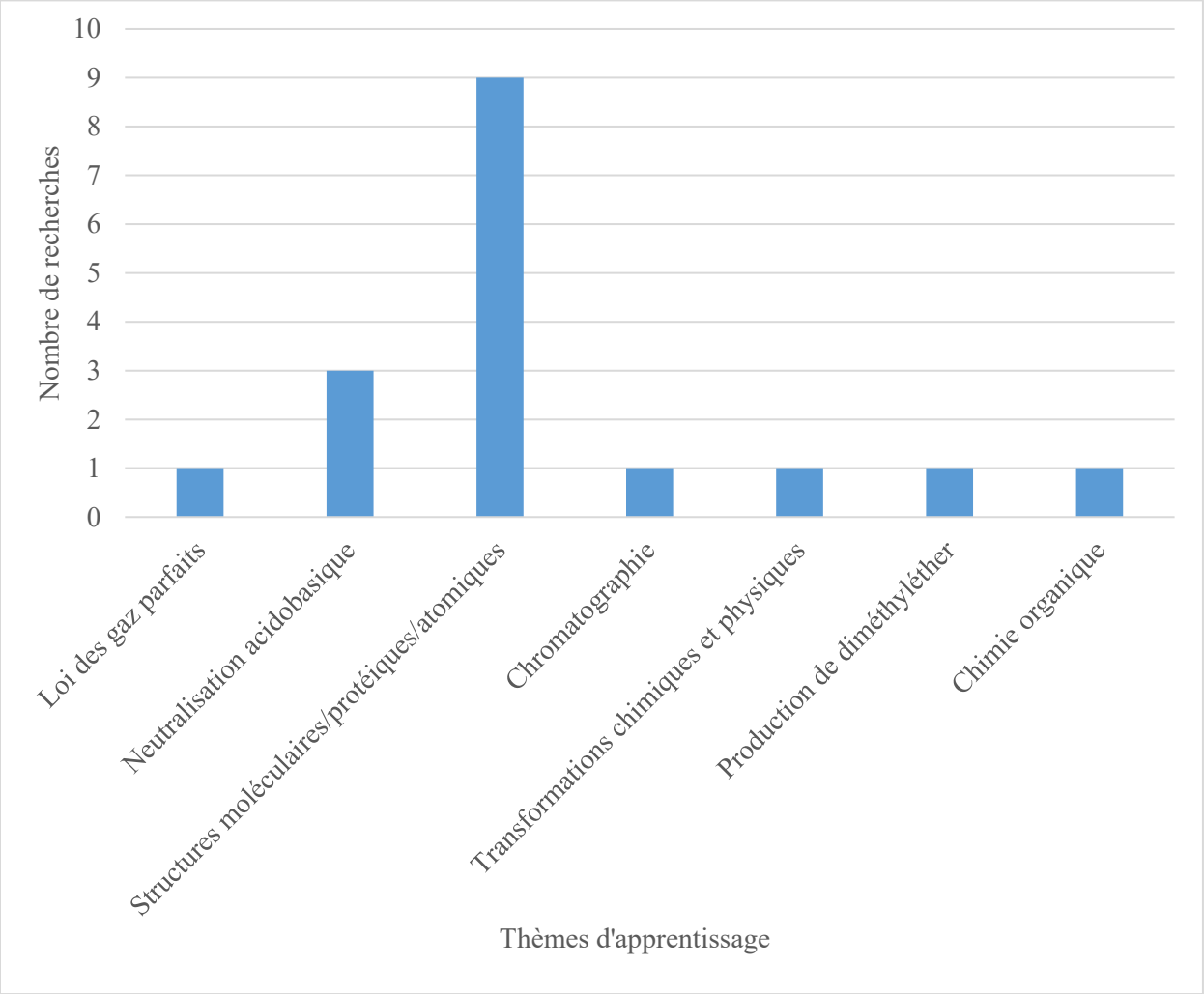


Figure 5. Thèmes des activités

La figure 5 indique que la plupart des recherches se sont centrées sur l'apprentissage des structures chimiques, qu'elles soient moléculaires, protéiques ou atomiques.

5.2 L'articulation des connaissances dans l'apprentissage des thèmes scientifiques

Pour que les apprentissages étudiés dans une recherche s'accordent avec la modélisation, ils devaient articuler des réflexions théoriques, des expériences empiriques qui ancrent

concrètement ses réflexions et un système de communication qui facilite la compréhension et l'explication des réflexions (Kermen et Méheut, 2009). Pour déterminer si cet arrimage est présent dans les apprentissages ciblés dans les recherches, les relations établies entre les connaissances théoriques, les connaissances empiriques et les systèmes de communication ont été décortiquées et classées à l'aide du tétraèdre chimique. Selon ce modèle, un modèle en chimie établit des relations entre des concepts théoriques (d'ordres microscopique ou macroscopique), des connaissances empiriques et des systèmes symboliques, chacun représentant un registre de connaissances (Kermen et Méheut, 2009). En associant les connaissances théoriques aux registres de concepts microscopiques ou macroscopiques, les expériences des élèves au registre empirique et les systèmes de communication au registre symbolique, il était possible de caractériser les apprentissages en fonction de quels registres de connaissances étaient liés. Ce faisant, l'analyse de ces relations, baptisées relations conceptuelles, a permis d'identifier quels thèmes d'apprentissage ont été abordés par une activité de modélisation. La prochaine section donne des exemples des différentes relations conceptuelles identifiées avant de présenter les résultats qui y sont liés.

L'articulation de connaissances théoriques aux expériences des élèves était observée lorsque des concepts étaient reliés à un contexte connu de l'apprenant. Par exemple, Hu-Au et Okita (2021) ont font réaliser des réactions de précipitation pour que les élèves apprennent à distinguer les transformations chimiques (transformation de la nature de la matière) des transformations physiques (transformation de la forme de la matière). L'apprentissage visé arrimait donc des connaissances théoriques et une expérience, donc était classé « Concept+expérience ».

Les apprentissages pouvaient aussi cibler la relation entre une connaissance théorique et la représentation utilisée pour la communiquer et la comprendre. C'est le cas de l'activité de Brown et al. (2021), qui projetait avec la RA les structures moléculaires de différentes substances pour que les élèves les traduisent avec la notation de Lewis. Les élèves devaient donc relier leurs connaissances théoriques liées aux structures moléculaires (connaissances théoriques) aux règles et aux codes de la notation de Lewis (système de communication). Ce type d'apprentissage relie un concept à un système de communication sans passer par une expérience, donc était classé « Concept+communication ».

Les apprentissages pouvaient également relier un système de communication, une expérience et un concept. Par exemple, l'apprentissage des lois des gaz parfaits dans la recherche de Chao et al. (2016) requiert que les élèves interprètent les variations de température à la fois d'un point de vue conceptuel (relation entre la vitesse des particules et la force exercée sur eux) et d'un point de vue mathématique (démonstration de l'équation des lois des gaz parfaits). Ce type d'apprentissage mettait donc en jeu des relations entre concepts, expériences et système de communication, donc était catégorisé « Concept+expérience+communication ». Ce sont ces apprentissages qui pouvaient être associés à la modélisation.

La figure 6 présente, pour chaque thème d'apprentissage, les proportions des recherches qui articulent les différents registres de connaissances.

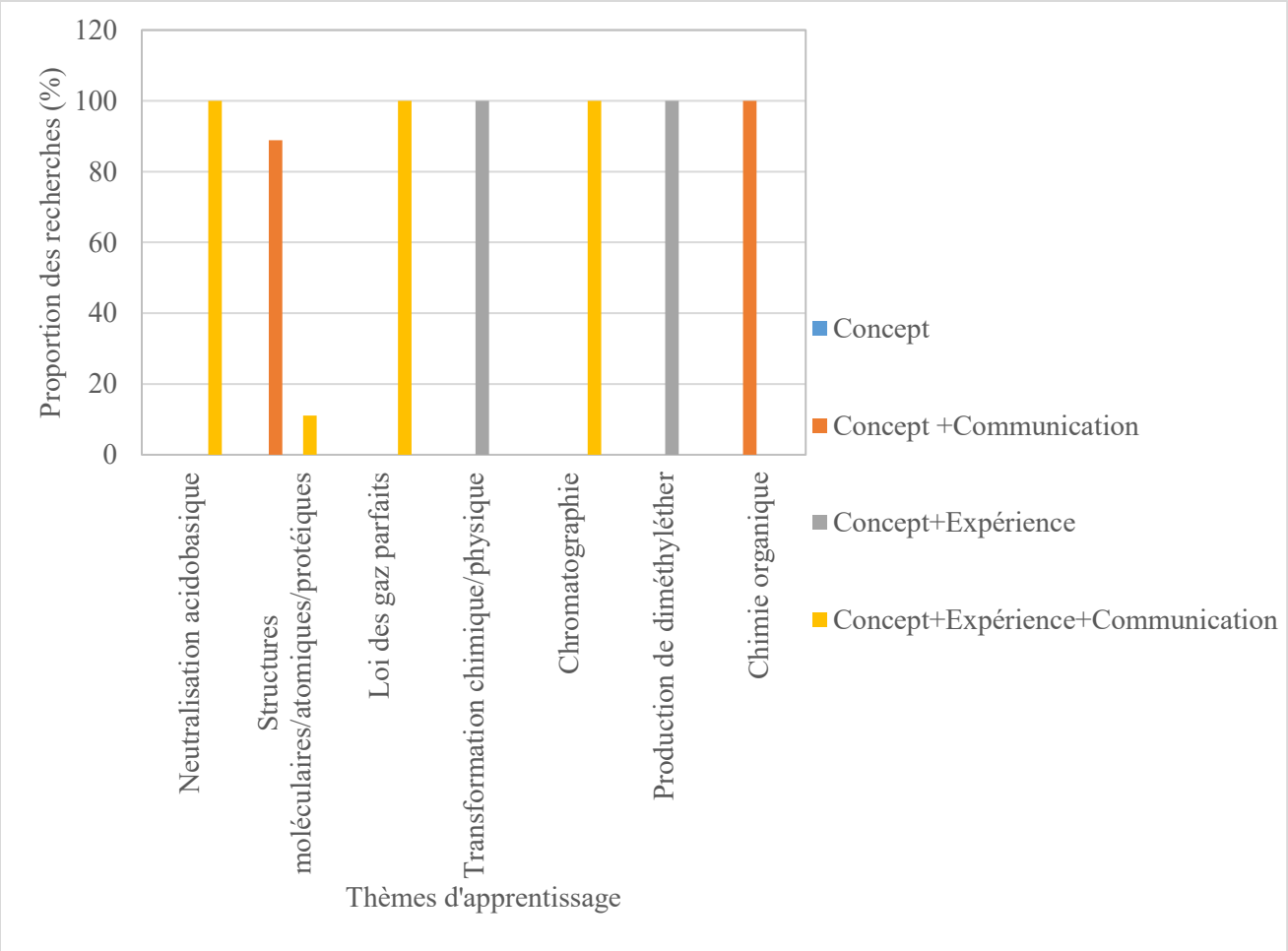


Figure 6. Proportions des différentes articulations entre concept, expérience et système de communication pour les différents thèmes d'apprentissage

Les proportions des différentes relations conceptuelles indiquent que la majorité des recherches sur l'apprentissage des structures chimiques avec la RV n'articulaient pas les connaissances théoriques aux expériences des élèves, mais se centraient sur la relation entre les concepts et le système de communication. Comme ce thème représentait la majorité des

recherches, cela signifie que la majorité des recherches se centraient sur un apprentissage théorique déconnecté d'une expérience, ce qui est cohérent avec l'absence de manipulation de données dans la plupart des recherches.

À l'inverse, les articles sur la production de diméthyléther et de la transformation chimique/physique articulaient les connaissances théoriques aux expériences des apprenants, mais pas avec un système de communication. Ces thèmes sont abordés chacun dans une seule recherche, donc ne représente pas une part importante des recherches.

Par ailleurs, la figure 6 indique que les apprentissages articulant connaissances théoriques, expériences et systèmes de communication étaient liés aux thèmes de la neutralisation acidobasique (3 recherches) de la chromatographie (1 recherche) et de la loi des gaz parfaits (1 recherche) et dans un cas, les structures chimiques. Toutefois, la figure 5 indiquait que ces thèmes étaient abordés dans peu de recherches. En effet, la neutralisation acidobasique est abordée dans 3 recherches, alors que la chromatographie et la loi des gaz parfaits sont abordées dans une seule recherche chacune. Ainsi, dans les dix-sept recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie en RV mesurant des apprentissages disciplinaires, il y en a six (35%) qui explicitent une intention d'apprentissage associée à la modélisation.

L'analyse des relations conceptuelles a permis de cerner ce qui était articulé dans les recherches sur les apprentissages de la chimie avec la RV et les thèmes d'apprentissage associés à la modélisation en RV. Toutefois, ces analyses ne permettent pas de savoir comment ces apprentissages étaient analysés dans les recherches. La prochaine section détaille quel type de savoirs étaient ciblés dans les recherches retenues.

5.3 Les types de savoirs mobilisés dans les recherches

Afin de comprendre comment les intentions d'apprentissage étaient opérationnalisées dans les recherches, il était nécessaire de vérifier comment les connaissances étaient évaluées. Quatre types de savoirs ont été identifiés en conformité avec notre cadre d'analyse: les savoirs formels, les savoir-faire, les attitudes et les démarches.

Les savoirs formels sont des connaissances théoriques déclaratives, comme la constitution des atomes, les interactions chimiques, la définition de la chromatographie, etc. Les savoirs formels sont liés à une évaluation de la compréhension des modèles, mais pas nécessairement à leur mobilisation pour structurer une démarche scientifique.

Les savoir-faire sont des connaissances opératoires, qui peuvent être soit liées strictement au contexte pratique, soit strictement à la manipulation des savoirs formels. Par exemple, la visualisation spatiale des molécules, les manipulations de laboratoire et la résolution de calculs stœchiométriques ont été évaluées dans certaines recherches.

Les démarches sont des méthodes scientifiques d'analyses, qui se distinguent des savoir-faire par leur contexte pratique et l'articulation de savoirs formels et opératoires. L'élaboration de protocoles pour réaliser une expérience est un exemple de démarche.

Les attitudes sont des comportements liés à la mise en œuvre d'une démarche d'apprentissage. La prise en compte de la sécurité en laboratoire est un exemple d'attitude.

La figure 7 présente les proportions de recherches qui analysaient chaque type de savoirs.

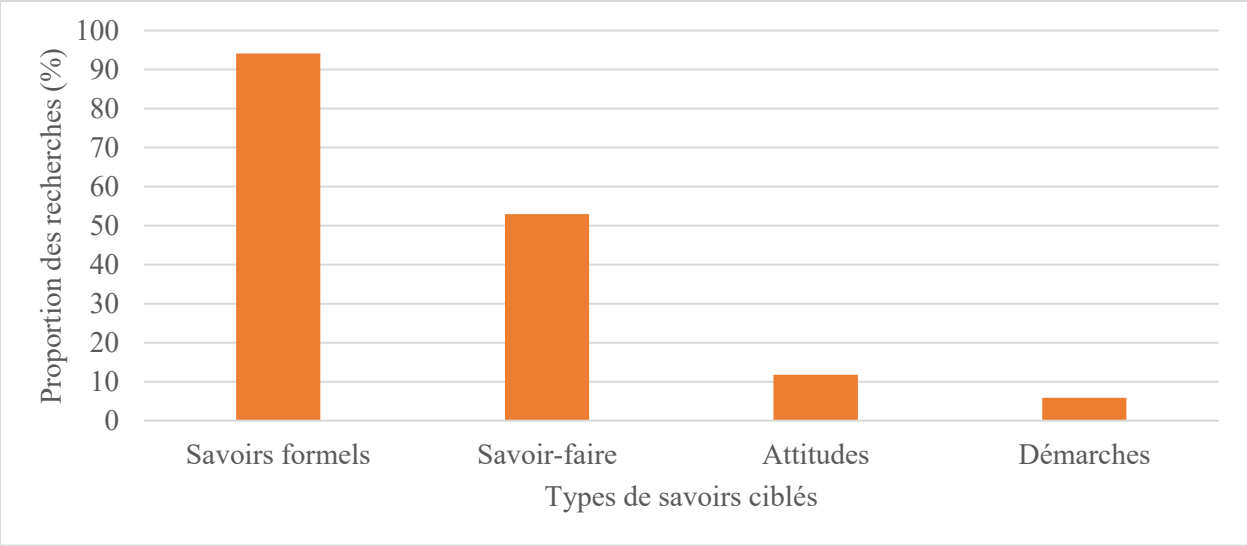


Figure 7. Type de savoirs ciblés dans les recherches

La figure 7 expose que les savoirs formels étaient davantage ciblés que les démarches, les attitudes et les savoir-faire. Cette focalisation sur la compréhension des savoirs formels met en lumière que l'articulation de connaissances théoriques et d'expérience notées dans les sections précédentes est orientée vers la compréhension théorique des phénomènes plutôt que la compréhension de la démarche scientifique. Que les savoir-faire ont été plus souvent ciblés que les démarches renforce ce constat.

6. LES ACTIVITÉS DES ÉLÈVES DANS LES ENVIRONNEMENTS RV : LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION EN ACTION

L'objectif de la modélisation est que l'élève élabore ses propres interprétations de phénomènes scientifiques à partir d'idées abstraites issues d'une démarche scientifique. En conséquence, cette démarche implique que les élèves réalisent des actions et soient placés dans des conditions favorisant l'interprétation abstraite. Pour déterminer si ces conditions étaient remplies dans les recherches retenues, il est nécessaire de comparer les tâches des élèves aux différentes phases de la modélisation. Une première condition analysée était le rôle et les caractéristiques des modèles dans la réflexion des élèves. Ensuite, la présence d'une tâche de représentation a été utilisée pour déterminer si les recherches retenues amenaient les élèves à articuler les différents registres de connaissances dans l'activité d'apprentissage. En dernier lieu, la justification et le sens des modèles naissant des problèmes scientifiques, les questions et objectifs soumis aux élèves ont été analysés pour déterminer si l'activité confrontait l'élève à un problème scientifique.

6.1 L'intégration des modèles

Afin de déterminer si les recherches mobilisaient la modélisation pour l'apprentissage de la chimie en RV, il était nécessaire de s'assurer que les activités réalisées articulaient leurs intentions d'apprentissage à la mobilisation d'un modèle scientifique par les élèves. Pour ce faire, une activité devait non seulement présenter un modèle, mais aussi le mobiliser de sorte que l'élève l'utilise pour comprendre les concepts ou l'élabore.

6.1.1 La présence de modèles

Le point de départ de l'analyse des modèles était de vérifier si les activités en présentaient. Une activité d'apprentissage présentait un modèle lorsque l'élève avait explicitement à sa disposition une représentation de connaissances scientifiques abstraites. Par exemple, certaines activités projetaient en RV ou en RA des structures moléculaires, mettant à la disposition de l'élève une représentation des connaissances abstraites sur les interactions chimiques.

Une activité ne présentait pas de modèle si le savoir n'était pas lié à une représentation des connaissances. Par exemple, dans le laboratoire en RV de Hu-Au et Okita, les élèves réalisent des laboratoires en RV pour distinguer les transformations chimiques et physiques, mais les élèves n'ont pas à leur disposition une représentation graphique, dessinée ou autre pour distinguer les deux transformations.

La figure 8 présente les proportions d'articles dont les recherches présentaient des modèles dans les activités d'apprentissage.

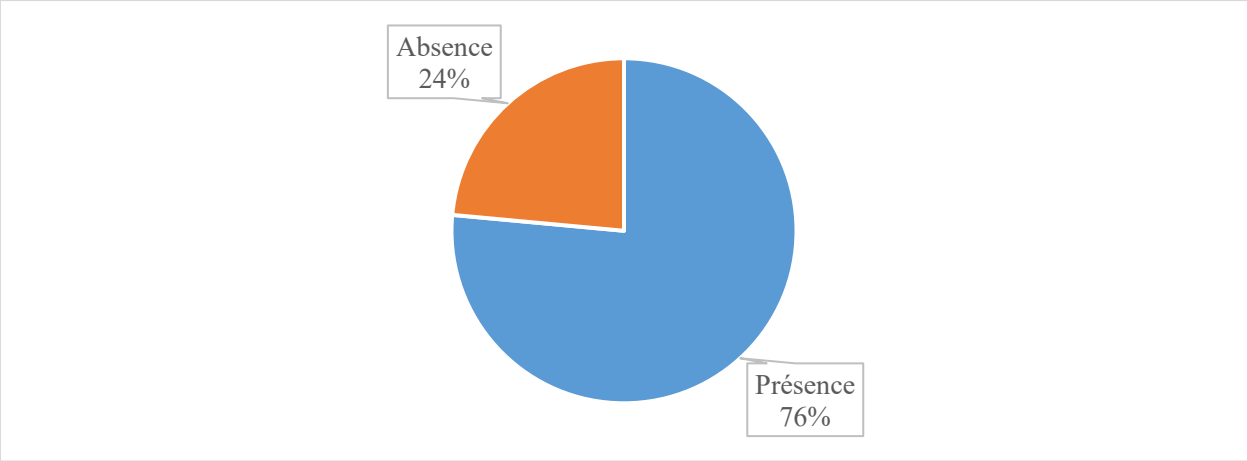


Figure 8. Proportions d'activités présentant un modèle

La figure 8 expose que la majorité des recherches ont présenté un modèle pour faciliter l'apprentissage. Toutefois, la présentation d'un modèle n'est pas suffisante pour définir une activité d'apprentissage comme de la modélisation. La façon dont le modèle est utilisé par l'élève est tout aussi importante. La prochaine section détaillera comment les modèles étaient utilisés dans les recherches.

6.1.2 Les usages des modèles pour impliquer l'élève dans l'apprentissage

Les modèles n'étaient pas utilisés de la même façon dans toutes les recherches et la modélisation suppose que le modèle est utilisé et/ou élaboré par les élèves pour interpréter une expérience. Pour définir comment les modèles étaient utilisés dans les activités, une typologie a été élaborée à partir du rôle du modèle dans l'apprentissage. Dans la prochaine section, les différents types de modèles vont être définis. Pour chaque type de modèle, un exemple concret sera présenté, puis la relation entre l'activité d'apprentissage et ce modèle sera mise en évidence.

La première catégorie est le modèle visé comme apprentissage. Ce type de modèle est défini comme un modèle observé par les élèves et devant être appris tel quel. Un exemple de ce type de modèle est donné par Brown et al. (2021): des structures moléculaires étaient présentées aux élèves, qui devaient apprendre à les transcrire dans une représentation 2D, à lier les structures moléculaires aux propriétés atomiques des atomes qui les constituent. Dans les activités mobilisant ce type de modèle, le modèle n'est pas questionné, élaboré ou utilisé par l'élève pour appréhender une expérience, il est ce qu'il faut apprendre. Les modèles visés comme apprentissage ne sont pas

compatibles avec la modélisation, puisque l'apprenant n'est pas autonome ou responsable de l'élaboration ou de l'utilisation du modèle pour interpréter un phénomène. De ce fait, les activités mobilisant ce type de modèle visent l'apprentissage du modèle, et non de la modélisation.

La seconde catégorie est le modèle utilisé comme « moyen d'apprentissage». Ce type de modèle est défini comme un modèle servant à articuler des connaissances et des données (réelles et convoquées). Un exemple de ce modèle est l'utilisation des lois des gaz parfaits dans les activités de Chao et al. (2016). Dans une de ces activités, les élèves devaient dessiner les molécules d'un gaz dans un piston et utiliser la loi de Boyle pour prédire comment la modification du volume changerait la pression, prédiction qu'ils vérifiaient ensuite dans une expérience. Le modèle est donc utilisé par l'élève pour articuler des résultats d'expérience à des explications théoriques et une équation mathématique, donc ne représente pas seulement l'apprentissage visé, mais un moyen pour apprendre. Ce type de modèle est compatible avec la modélisation, puisque les élèves sont responsables et autonomes dans l'utilisation du modèle pour expliquer les connaissances théoriques ou les expériences. Du fait que les modèles utilisés comme moyen sont nécessairement présentés, les activités utilisant ce type de modèles visaient à la fois l'apprentissage des modèles et de la modélisation.

La troisième catégorie est un modèle comme produit d'activité d'apprentissage. Ce type de modèle est défini comme un modèle issu du travail des élèves dans l'activité d'apprentissage. Un exemple de ce type de modèle est donné par Cai et al., où les élèves devaient assembler des atomes projetés en RA pour trouver les règles qui régissent l'assemblage des molécules, lesquelles forment les bases du modèle atomique. Dans ce genre d'activité, les élèves ne doivent donc pas utiliser le

modèle pour interpréter des données, ils devaient élaborer le modèle. Ce type de modèle était compatible avec la modélisation, puisque les élèves sont responsables et autonomes dans l'élaboration du modèle. Les activités utilisant ce type de modèles visaient l'apprentissage de la modélisation, mais pas exactement des modèles, puisque le modèle n'était pas explicitement enseigné.

La figure 9 présente la proportion des différents types de modèles trouvés dans les recherches recensées sur l'enseignement de la chimie en RV. Les recherches sans modèle n'ont pas été incluses dans ce graphique.

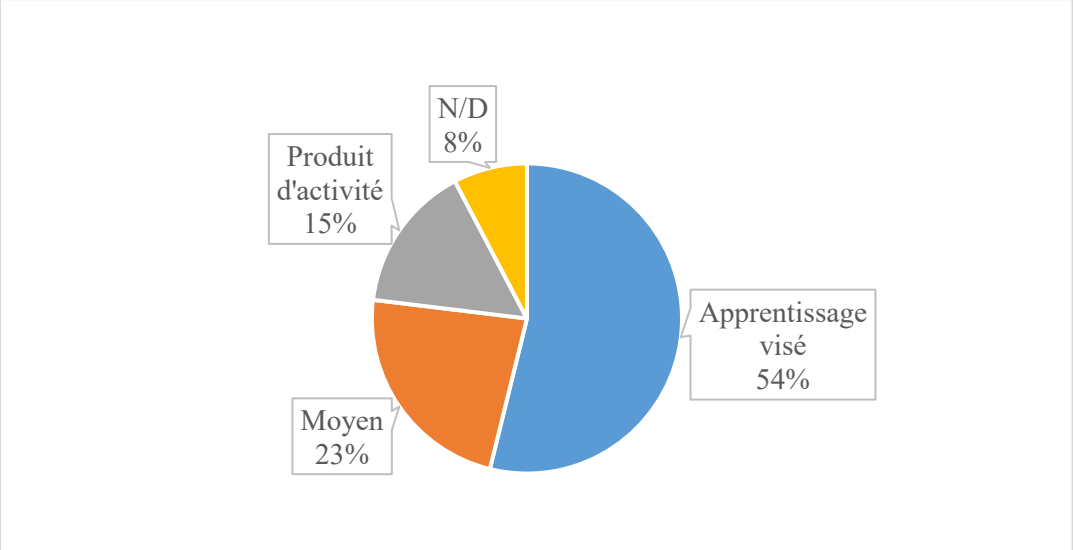


Figure 9. Proportions des types de modèles rencontrés dans l'activité

La figure 9 indique que la plupart des modèles sont des modèles visés comme apprentissage. Cette prépondérance des modèles visés comme apprentissage expose que dans la majorité des recherches retenues, les élèves n'étaient pas responsables de l'élaboration ou de

l'utilisation du modèle. Cette faible proportion de modèles compatibles avec la modélisation dans les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie en RV est cohérente avec le fait que la plupart de ces recherches ciblaient des apprentissages qui n'étaient pas associés à la modélisation. Ainsi, la RV est peu utilisée pour permettre à l'élève de développer ses propres réflexions, mais davantage pour s'approprier la représentation imposée par les enseignants.

6.1.3 Le pouvoir d'action des élèves sur les modèles

En plus de la manière dont le modèle est utilisé, le cadre de la modélisation attribue des caractéristiques aux modèles scientifiques qui devraient être utilisés. Martinand (2002) affirme que les modèles scientifiques sont hypothétiques, modifiables et contextualisés. Ces attributs sont utilisés pour illustrer que dans la modélisation, l'apprenant doit pouvoir agir sur le modèle. Pour déterminer si les modèles utilisés par les élèves étaient scientifiques, il était donc nécessaire de vérifier si ces attributs étaient présents dans les modèles présentés. Comme pour les types de modèles, la section suivante présentera une définition et un exemple pour chacun des attributs des modèles scientifiques.

Afin de distinguer les modèles sur lesquels les élèves n'avaient aucun pouvoir d'action, l'absence d'attributs scientifiques a aussi été définie et répertoriée. Un modèle est observable lorsque les élèves ne pouvaient qu'observer le modèle dans l'activité. Dans une activité centrée sur l'observation, les élèves n'ont aucun pouvoir d'action sur le modèle, puisqu'ils ne peuvent pas comparer d'hypothèses, modifier les variables du modèle ou en voir l'impact dans un contexte réel. Cette situation est caractéristique de l'activité menée par Habig (2020) : les élèves pouvaient voir les structures moléculaires, mais pas changer les atomes, relier la structure moléculaire à la

résultante d'une expérience réalisée ou prédire et comparer les répercussions des propriétés atomiques sur la formation ou non d'une structure moléculaire. La figure 10 présente la proportion de modèles observables.

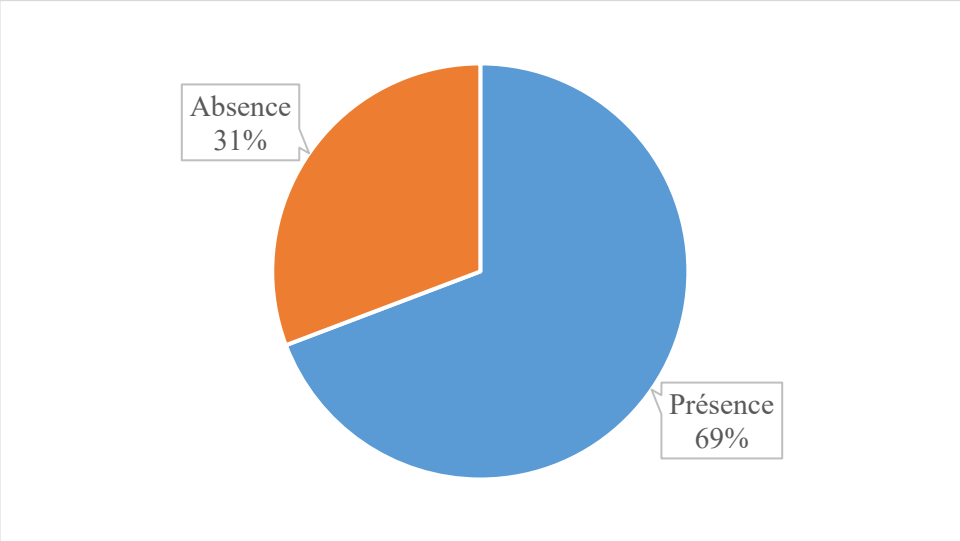


Figure 10. Proportions des modèles observables

La figure 10 indique que dans la plupart des recherches retenues présentant un modèle, les élèves n'ont pas de pouvoir d'action sur celui-ci. Cette prépondérance est cohérente avec la centration d'une majorité de recherches sur l'apprentissage des modèles plutôt que de la modélisation, que la prépondérance des modèles visés comme apprentissage avait mise en lumière.

Un modèle est hypothétique si l'élève était en mesure de comparer des idées en suivant une hypothèse. Par exemple, dans l'activité de Cai et al. (2014), les élèves pouvaient tenter d'assembler plusieurs atomes pour trouver la structure moléculaire de l'eau, ce qui permettait la comparaison

de différentes structures possibles. La figure 11 présente les proportions de modèles hypothétiques trouvés dans les recherches.

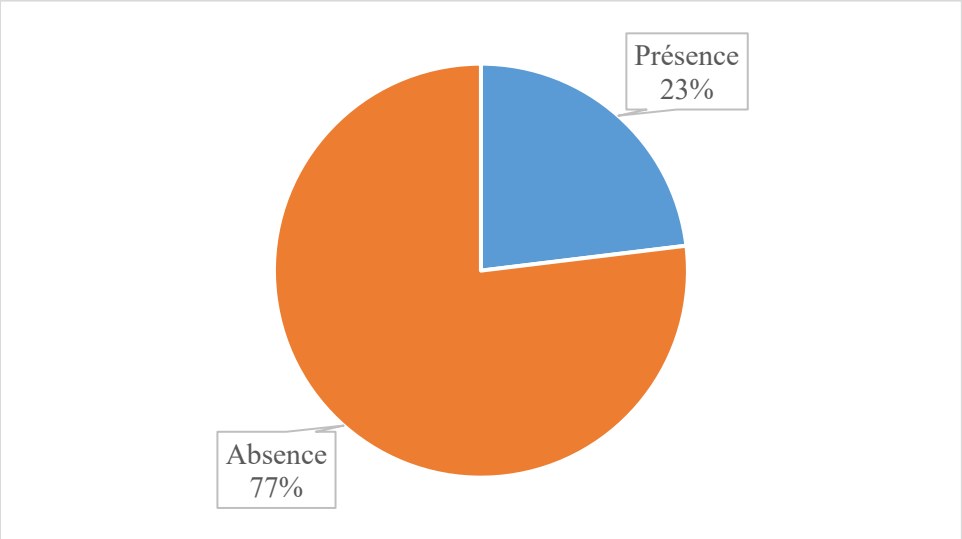


Figure 11. Proportions des modèles hypothétiques

La figure 11 met en exergue que la plupart des modèles n'étaient pas hypothétiques. Ceci met en évidence que la plupart des modèles utilisés dans les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie sont présentés de façon normative, ce qui est cohérent avec la prépondérance des modèles observables et la centration des recherches sur l'apprentissage des modèles. Toutefois, la proportion de modèles hypothétiques est inférieure aux proportions de modèles moyens d'apprentissage et produits d'activités (38% de la figure 9). Ceci indique que même dans les recherches présentant des modèles de façon compatible avec la modélisation, le modèle était parfois imposé sans comparaison possible.

Un modèle modifiable est un modèle dont les variables pouvaient être modifiées par les élèves. Par exemple, dans l'activité de Chao et al. (2016), les élèves avaient la possibilité d'intégrer la masse atomique aux lois des gaz parfaits. L'intégration d'une nouvelle variable indique que l'élève pouvait modifier le modèle. La figure 12 présente les proportions de modèles modifiables retrouvées dans les recherches.

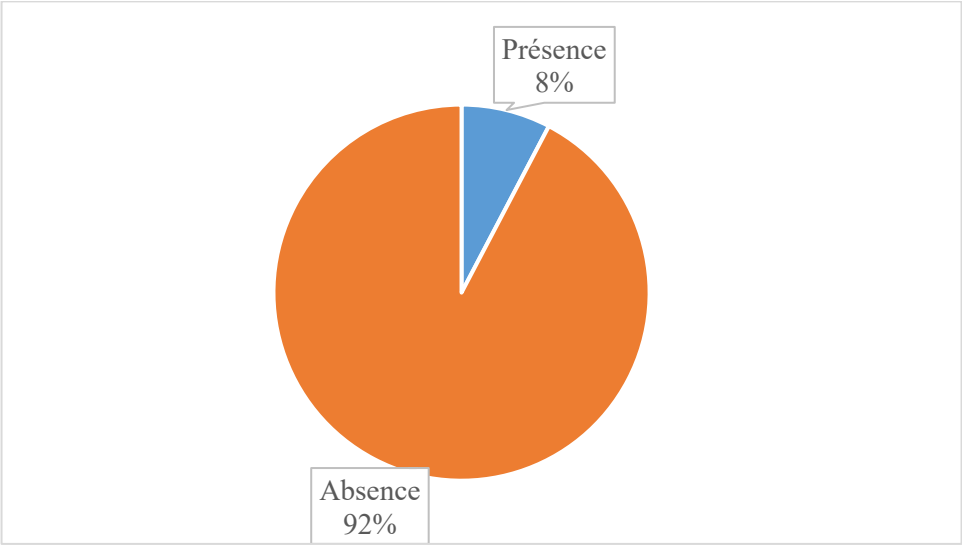


Figure 12. Proportions des modèles modifiables

La figure 12 expose que la plupart des modèles ne sont pas modifiables, à l'instar du constat des modèles hypothétiques. Ce constat est cohérent avec la prépondérance des modèles observables et de la centration des recherches sur l'apprentissage des modèles plutôt que de la modélisation.

La proportion de modèles modifiables est inférieure à celles des modèles hypothétiques (23%). Cette différence met en évidence que les recherches utilisant la RV pour l'apprentissage de

la chimie se centrent sur la comparaison d'idées à l'intérieur d'un modèle fixe davantage que l'intégration ou rejet de nouvelles variables. De plus, la proportion de modèles modifiables est inférieure à la proportion de modèles compatibles avec la modélisation (38%). Cette différence expose que même dans les recherches permettant l'apprentissage de la modélisation, l'appréhension du modèle est encadrée de telle sorte que les élèves ne peuvent intégrer de nouvelles variables.

Un modèle contextualisé est un modèle dont l'élève pouvait voir l'impact dans un contexte réel. L'utilisation de la loi des gaz parfaits pour interpréter les résultats d'une expérience en est un exemple. La figure 13 présente les proportions de modèles contextualisés dans les recherches recensées.

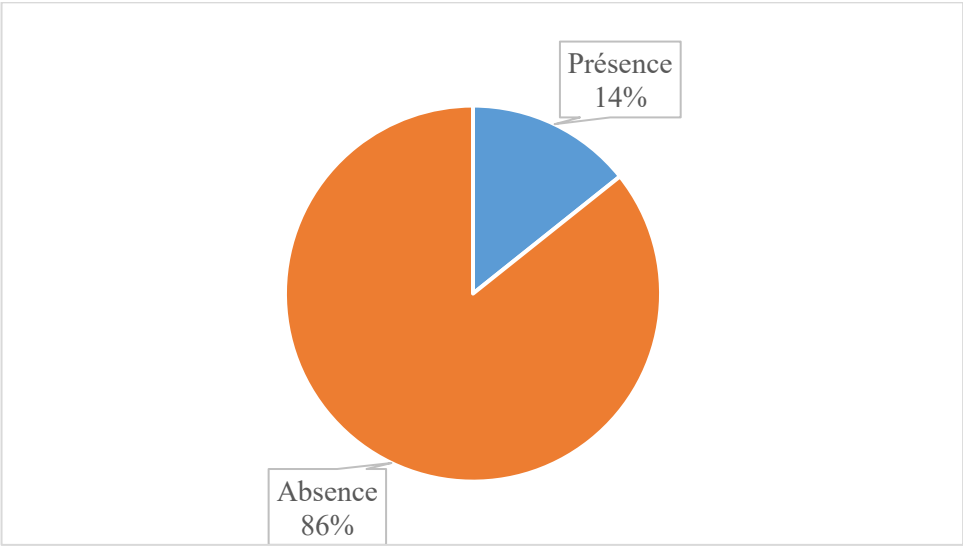


Figure 13. Proportions des modèles contextualisés

La figure 13 met en évidence que la plupart des modèles utilisés en RV ne sont pas appliqués dans un contexte réel. Le fait que la proportion de modèles contextualisés soit inférieure à la proportion de modèles moyens d'apprentissage (23% dans la figure 9) expose que des activités utilisant des modèles en RV pour que les élèves interprètent une expérience utilisent des situations convoquées plutôt que des situations réelles. Cette situation est cohérente avec le fait que la plupart des RV utilisées dans les recherches recensées n'impliquaient pas un contexte expérimental pour que les élèves analysent les conséquences de leurs actions, comme mentionné dans la section 4.2.

Afin qu'un modèle soit considéré comme scientifique, il devait posséder les trois attributs des modèles scientifiques. La figure 14 présente les proportions de modèles scientifiques.

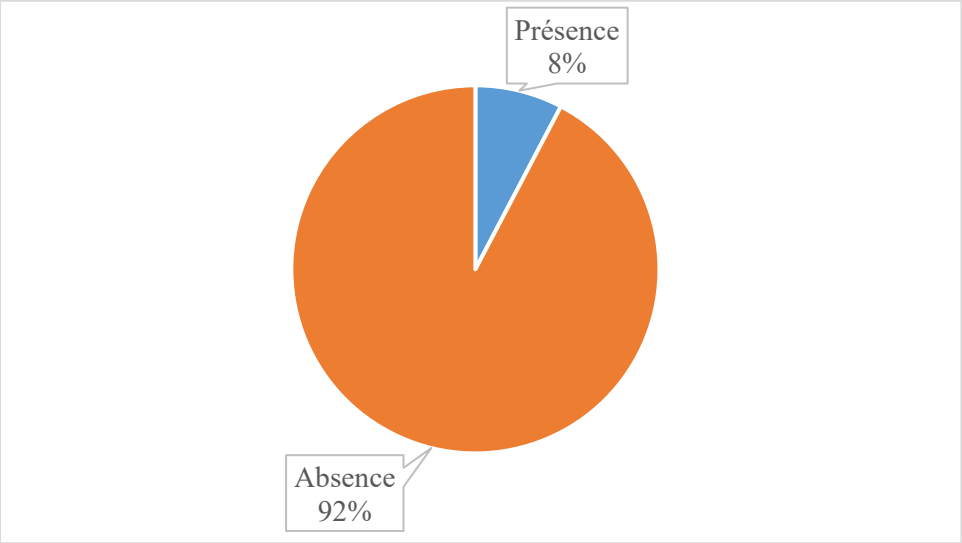


Figure 14. Proportions des modèles scientifiques

La figure 14 permet de constater que la plupart des modèles ne sont pas scientifiques. Ce constat est cohérent avec le fait que les proportions de modèles hypothétiques, modifiables ou

contextualisés soient différentes et que la plupart des modèles soient observables. Cela illustre que dans les recherches retenues sur l'enseignement de la chimie avec la RV, les élèves ont peu de pouvoir sur le modèle à apprendre, puisque celui-ci est souvent présenté de façon normative et qu'il constitue l'objet d'apprentissage. Ceci indique que même les modèles utilisés de façon compatible avec la modélisation n'avaient pas tous les attributs des modèles scientifiques.

6.2 La tâche de représentation : l'articulation des connaissances dans l'acte d'apprentissage

Un aspect central de la modélisation est le passage d'une description phénoménographique à une description phénoménologique des phénomènes scientifiques. Pour que l'apprentissage amène les élèves à réaliser cette transition, ils doivent traduire leurs connaissances empiriques en interprétation conceptuelle grâce à l'intermédiaire d'un modèle scientifique. Pour vérifier si les recherches retenues ont amené les élèves à opérer cette traduction, nous avons vérifié si une tâche de représentation était présente dans les activités des recherches retenues et si celle-ci amenait l'élève à étendre le pouvoir explicatif des concepts enseignés.

6.2.1 Présence de tâche de représentation

La tâche de représentation est définie comme : une tâche intellectuelle dans laquelle l'élève transforme ou passe d'un registre de connaissances (théoriques ou issue d'une expérience) à un autre à partir d'un système de communication (graphique, dessin, explication textuelle ou verbale, etc.). Par exemple, lorsque Merino et al. (2022) demandaient aux élèves d'expliquer comment optimiser la résolution d'une chromatographie, il s'agit d'une tâche de représentation. Cette tâche

nécessitait de transformer les modifications des variables du calcul de la résolution en chromatographie (connaissances théoriques) en opérations possibles dans un laboratoire de chromatographie (connaissances liées à l'expérience) dans une explication, un dessin et/ou une démonstration mathématique (système de communication).

Par opposition, lorsque Brown et al. (2021) demandent aux élèves de transcrire une structure moléculaire 3D en notation de Lewis, il ne s'agissait pas d'une tâche de représentation, puisque les connaissances théoriques sur les structures moléculaires n'étaient pas transférées ou transformées dans un contexte d'expérience. Il n'y avait donc pas de transfert de connaissances d'un type de registre à un autre type de registre, seulement d'un système de communication à un autre. La figure 15 présente les proportions des recherches recensées sur l'enseignement de la chimie en RV qui intégraient une tâche de représentation.

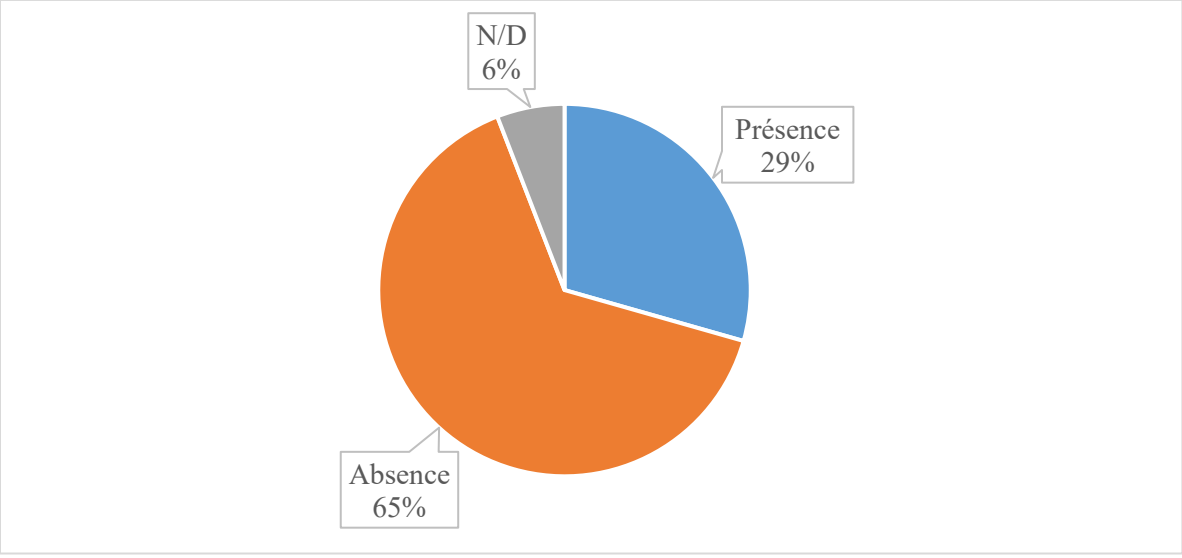


Figure 15. Proportions d'activités impliquant une tâche de représentation

La figure 15 met en évidence que la plupart des recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie ne mobilisaient pas une tâche de représentation. Cela illustre que les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie n'ont pas souvent mobilisé le principe de l'apprentissage génératif, c'est-à-dire que l'apprentissage nécessite un traitement en profondeur des informations présentées pour s'en faire une représentation mentale cohérente. De plus, la faible présence de tâches de représentation expose que les activités d'apprentissage dans les recherches retenues n'impliquent pas un passage d'une interprétation quotidienne (phénoménographie) à une interprétation scientifique (phénoménologie), qui est à la base de la modélisation scientifique.

6.2.2 Utilisation des modèles en RV pour explorer les limites des explications avec le modèle

Outre l'articulation de connaissances théoriques, d'expériences et de système de communication, la modélisation suppose que la tâche de représentation permet aux élèves d'explorer et expliciter les règles de l'interprétation du modèle. Deux tâches avaient été identifiées pour guider les élèves dans cette exploration : l'identification d'interprétations impossibles des connaissances théoriques, pour structurer l'interprétation des connaissances théoriques et la distinguer de l'interprétation expérimentale; et l'application du modèle à d'autres expériences que celle dont il est issu, pour généraliser l'interprétation des connaissances théoriques à plusieurs expériences (Larcher, 1994). Pour déterminer, si les tâches de représentation réalisées dans les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie en RV avaient guidé les élèves dans l'exploration des limites des explications du modèle, la présence de ces tâches a été vérifiée.

Une tâche d'identification d'interprétations impossibles était définie comme une tâche dans laquelle les élèves justifiaient à partir de ces connaissances théoriques pourquoi certaines

observations ou conclusions sont impossibles. Aucune recherche recensée mesurant un apprentissage disciplinaire suite à l'enseignement de la chimie en RV n'a explicité une telle tâche. Cette absence illustre que la tâche de représentation n'était pas utilisée pour distinguer l'interprétation des connaissances théoriques et des expériences. Ce constat est cohérent avec la faible proportion de modèles hypothétiques et modifiables, qui indiquait que les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie accordaient peu de place à la remise en question et à la modification par les élèves des modèles présentés. Par ailleurs, l'absence de tâches de recherche d'incohérences renforce le constat que les modèles sont présentés de façon normative aux élèves, même dans les recherches qui ont des intentions et des activités d'apprentissage compatibles avec la modélisation.

L'application du modèle dans d'autres expériences était définie comme une tâche dans laquelle les élèves devaient utiliser des connaissances théoriques mobilisées antérieurement pour interpréter une expérience différente. Par exemple, lorsque Chao et al. (2016) demandent aux élèves d'utiliser la notion de collisions moléculaires pour expliquer la relation entre température et pression ou entre volume et pression, les mêmes connaissances théoriques sont utilisées pour interpréter deux expériences différentes. Ce genre de tâche permettait aux élèves d'articuler plusieurs connaissances issues de l'expérience aux mêmes connaissances théoriques, donc d'expliciter pourquoi l'interprétation du modèle dépasse l'interprétation de l'expérience. La figure 16 présente les proportions des recherches impliquant une tâche de représentation qui ont intégré une tâche d'application du modèle dans de multiples expériences.

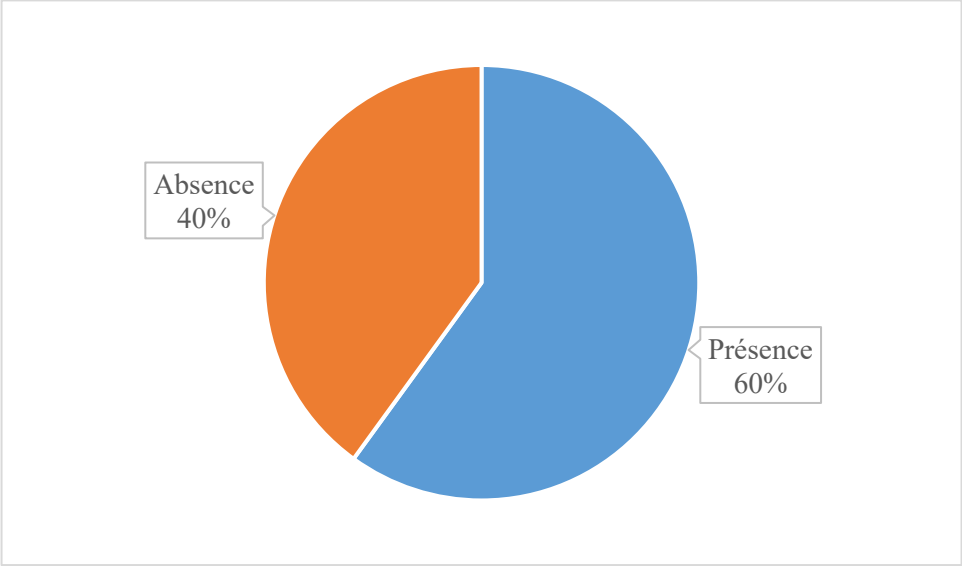


Figure 16. Proportions de recherches intégrant une tâche d'application du modèle dans de multiples expériences

La figure 16 montre que la plupart des recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie en RV mesurant des apprentissages disciplinaires ont appliqué un modèle dans plusieurs expériences. Ce constat indique que la tâche de représentation était utilisée pour exposer que l'interprétation du modèle pouvait être généralisée à plusieurs expériences. En conséquence, plusieurs recherches mesurant des apprentissages disciplinaires suite à l'enseignement de la chimie en RV amenaient les élèves à expliciter l'étendue de l'articulation entre les connaissances théoriques et issues des expériences.

Le contraste entre l'intégration de l'application d'un modèle à plusieurs expériences et l'absence de tâche d'identification des interprétations impossibles montre que les tâches de représentation au sein des recherches recensées étaient davantage centrées sur l'articulation entre

les connaissances théoriques aux expériences que sur la distinction entre l'interprétation de l'expérience et des connaissances théoriques.

6.3 Les problèmes scientifiques

Étant donné que les modèles scientifiques sont développés pour répondre à des problèmes scientifiques, l'apprentissage par la modélisation devrait s'ancrer dans la résolution de problèmes scientifiques. En conséquence, la présence de problèmes scientifiques dans les activités dans les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie en RV mesurant des apprentissages a été vérifiée.

Un problème scientifique était défini comme un questionnement soumis à l'élève dont la résolution justifie la nécessité des connaissances théoriques pour comprendre un phénomène. Un exemple de problème scientifique est la question de Merino et al. sur les causes des différences de vitesse de déplacement des particules dans une chromatographie. La réponse à cette question, quelle qu'elle soit, met en lumière que la séparation observée des substances ne peut être ni expliquée ni contrôlée sans les concepts d'attirance électrique, puisque toutes les substances étaient dans les mêmes conditions. Ce faisant, le questionnement rend les connaissances théoriques sur la chromatographie nécessaire pour comprendre la séparation des substances. La figure 17 présente les proportions de recherches recensées présentant aux élèves un problème scientifique.

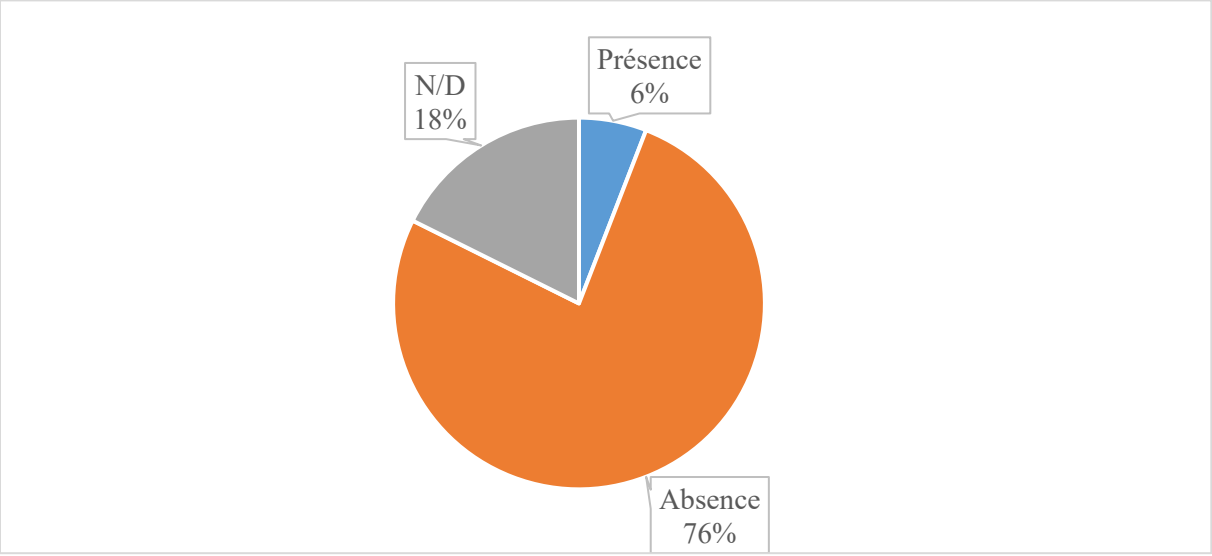


Figure 17. Proportions des activités présentant un problème scientifique

La figure 17 met en évidence que la majorité des recherches retenues ne mettaient pas en jeu un questionnement pour rendre le savoir scientifique nécessaire à la compréhension d'un phénomène. En conséquence, les apprentissages disciplinaires réalisés dans les recherches sur l'enseignement de la chimie avec la RV visaient la compréhension de concepts sans aborder ce qui leur donne sens.

7. INTÉGRATION DE L'ENSEMBLE DES CONTRAINTES DE LA MODÉLISATION

Les sections précédentes ont traité de l'intégration des contraintes de la modélisation de façon séparée. Or, pour qu'une recherche mobilise la modélisation, l'ensemble des contraintes de celles-ci devaient être intégrées à l'apprentissage. Ces contraintes étaient : 1- une intention d'apprentissage associé à la modélisation; 2- la présence d'une tâche de représentation; 3- la présence d'un type de modèle compatible avec la modélisation (moyen d'apprentissage ou produit

d'activité); 4- la présence d'un contexte expérimental; 5- la présence d'un modèle scientifique (hypothétique, modifiable et contextualisé); 6- la présence d'un problème scientifique. La figure 18 présente les différentes combinaisons de contraintes de la modélisation articulées dans les recherches recensées et leurs proportions respectives.

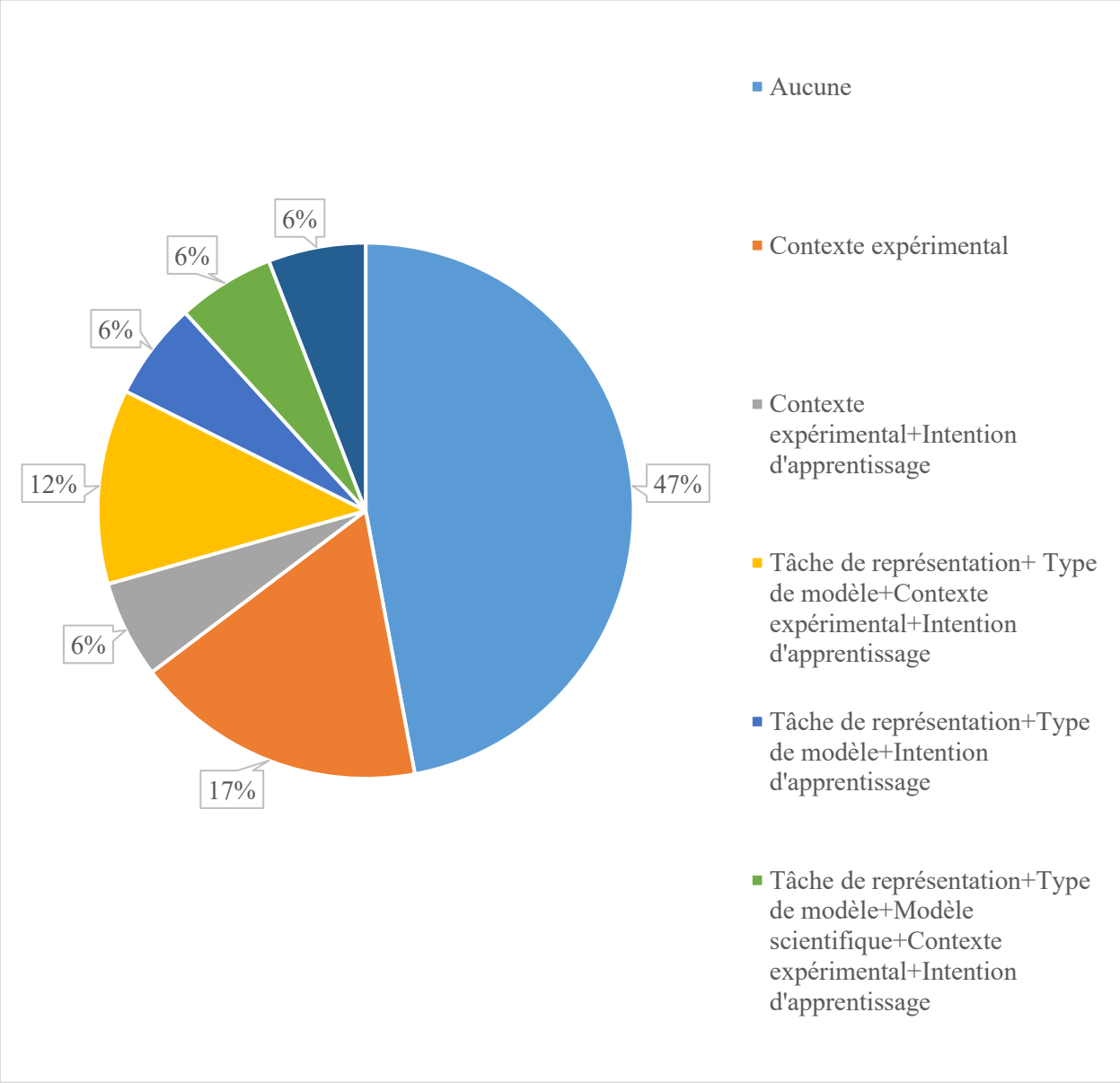


Figure 18. Proportions des activités prenant en compte les contraintes de la modélisation

La grande proportion bleu ciel indique que près de la moitié des recherches sur les apprentissages disciplinaires suite à l'enseignement de la chimie avec la RV n'ont appliqué aucune contrainte de la modélisation. Ceci expose une grande convergence parmi les recherches qui n'intégraient pas les contraintes de la modélisation. Autrement dit, lorsqu'une recherche n'intégrait pas la manipulation de données, généralement elle n'intègre pas non plus la tâche de représentation, un problème scientifique, un modèle scientifique et une intention d'apprentissage compatible avec la modélisation. Cela met en lumière que près de la moitié des recherches sur les apprentissages disciplinaires utilisaient la RV strictement pour illustrer un concept abstrait plutôt qu'un outil d'apprentissage pour que l'élève articule des connaissances théoriques et des connaissances issues d'expériences dans un système de représentation.

Un autre indice de cette convergence est qu'une seule recherche présentait un apprentissage associé à la modélisation sans intégrer une tâche de représentation et un modèle compatible avec la modélisation (grise). Cela met en lumière que la plupart des recherches présentant des apprentissages articulant des connaissances théoriques, empiriques et un système de communication laissaient les élèves responsables de l'utilisation ou de l'élaboration du modèle. De même, une seule recherche intégrant une tâche de représentation et un apprentissage associé à la modélisation n'intégrait pas la manipulation de données (bleue).

Par contre, il est à noter qu'aucune des recherches recensées n'a articulé les six contraintes de la modélisation identifiées. En effet, une seule recherche avait mobilisé un problème scientifique (bleu marin) et une seule recherche avait mobilisé un modèle scientifique (vert), mais

il ne s'agissait pas de la même recherche. En conséquence, aucune recherche mesurant un apprentissage disciplinaire suite à l'enseignement de la chimie avec la RV n'a mesuré l'impact de la modélisation sur ses apprentissages. En plus, deux recherches ont utilisé la manipulation de données sans intégrer une autre contrainte de la modélisation (orange).

CONCLUSION

Dans le cadre de notre recherche, nous avons documenté en profondeur l'état des recherches scientifiques publiées entre 2010 et 2023 sur l'usage de la réalité virtuelle dans l'enseignement de la chimie. Notre objectif était de comprendre, données empiriques à l'appui, comment les études conjuguent les caractéristiques offertes par l'environnement virtuel et les conditions didactiques requises par la modélisation, démarche structurante dans l'enseignement de la chimie. En effet, cette démarche amène l'élève à établir des relations adéquates entre la réalité empirique et les concepts abstraits par l'utilisation de modèles scientifiques. L'établissement de ces relations est ce qui constitue le cœur des difficultés des élèves dans l'apprentissage de la chimie, qu'il s'agisse de la compréhension du langage chimique, de la représentation du modèle atomique ou de l'interprétation des résultats de laboratoire et des équations de réaction. De ce fait, l'adaptation des technologies immersives à cette démarche est cruciale pour qu'elles aient un impact réel sur les apprentissages des élèves.

Le cadre conceptuel qui a orienté notre analyse s'appuie sur les fondements didactiques de la modélisation, la structure épistémologique des modèles en chimie et les principes théoriques qui guident l'apprentissage avec la RV. Nous avons montré qu'il est possible de transposer les contraintes épistémologiques et didactiques de la modélisation dans les principes théoriques qui guident l'apprentissage avec la RV. Cette transposition peut avoir lieu dans les intentions d'apprentissage guidant les activités avec la RV, dans le contexte d'utilisation de la RV (fonctions d'usage de la RV, présence de données issues d'une expérience réelle), dans la tâche demandée à l'élève (prise en charge de l'articulation entre connaissances empiriques, théoriques et langage

chimique, identification et résolution d'un problème scientifique), et la nature des modèles mobilisés (fonctions d'usage du modèle, correspondance avec les caractéristiques épistémologiques des modèles scientifiques).

Afin de prendre en compte l'ensemble des pratiques d'utilisation de la RV pour l'enseignement-apprentissage de la chimie présentes dans les recherches scientifiques, nous avons procédé à une recension systématique de la littérature dans trois banques de données. Nous avons retenu les articles anglophones qui mentionnaient explicitement la réalisation d'une activité d'enseignement-apprentissage de la chimie avec la RV.

Les résultats ont fait ressortir trois grandes orientations des recherches empiriques sur l'utilisation de la RV dans l'enseignement-apprentissage de la chimie : l'analyse des perceptions du personnel professionnel utilisateur, l'analyse de la relation entre des aspects psychopédagogiques et l'utilisation de la RV et la mesure des effets de la RV sur les apprentissages disciplinaires. Les premières sont orientées sur l'évaluation de la qualité de la RV du point de vue des enseignants ou d'autres professionnels. Ces recherches répondent à un besoin de confirmer que les technologies immersives utilisées répondaient aux attentes des enseignants, sans quoi ces derniers ne seraient pas intéressés d'utiliser ces technologies. Les secondes mettaient en perspective le caractère motivant ou la perception d'apprentissage par les élèves, sans aborder l'impact réel de la RV sur les apprentissages des élèves. Ainsi, elles répondent de manière analogue à la question de l'intérêt pour l'adoption des technologies immersives, mais en partant du point de vue de l'élève. Les résultats de ces recherches illustrent que les enseignants perçoivent un potentiel de la RV pour faciliter l'apprentissage, que ce soit pour son attrait visuel ou sa correspondance aux

apprentissages des programmes scolaires. De même, les élèves sont généralement motivés à court terme et ont l'impression de mieux comprendre les savoirs enseignés à l'aide de la RV, indiquant qu'ils seraient intéressés par les technologies immersives. Aucune recherche n'a toutefois explicité de résultats confirmant que cet intérêt se maintient au-delà d'une activité ponctuelle, gardant inconnus l'effet de la RV sur la motivation à long terme et le biais possible de l'effet de nouveauté.

Toutefois, ces deux premières orientations ne questionnent pas la valeur de l'intégration de ces technologies pour résoudre les difficultés d'apprentissage des élèves et faciliter la modélisation en classe. Seules les recherches sur les apprentissages disciplinaires ont donc été retenues dans l'analyse de l'intégration des contraintes didactiques de la modélisation dans l'utilisation de la RV.

Les résultats de notre analyse mettent en évidence une grande diversité dans l'articulation des contraintes didactiques de la modélisation en RV. En effet, les recherches intégrant les contraintes de la modélisation ne formaient pas un groupe homogène où toutes les contraintes étaient intégrées, mais plutôt un ensemble disparate où certaines contraintes se recoupaient davantage que d'autres. À l'inverse, les recherches n'intégrant aucune contrainte de la modélisation forment le plus grand regroupement de recherches. Ce contraste découle du fait que chaque contrainte didactique de la modélisation est intégrée dans une minorité de recherches, mais à des degrés divers. Par exemple, malgré qu'il y ait plus de recherches où les élèves manipulaient des données réelles en RV que de recherches soumettant des tâches de représentations, il y avait des tâches de représentation sans données réelles et des données réelles sans tâche de représentation.

Le contraste dans l'intégration de contraintes de modélisation explique probablement les divergences dans les résultats des RV sur les apprentissages des élèves. En effet, dans les recherches utilisant la RV comme source de données, bien que moins nombreuses, présentent plus souvent des impacts positifs que d'absence d'impact, alors que les recherches se basant seulement sur l'illustration de concepts abstraits rapportaient presque autant d'absences d'impact que d'impact positif. Cette double tendance, c'est-à-dire le fait que la proportion de recherches indiquant un effet positif de la RV sur les apprentissages disciplinaires soit supérieure pour les recherches intégrant les contraintes de la modélisation et qu'elles soient moins nombreuses, se répète dans l'intégration d'une intention d'apprentissage associé à la modélisation, d'une tâche de représentation et d'un contexte expérimental lié à des données réelles. Toutefois, le faible nombre de recherches ne permet pas de démontrer une tendance statistique. La plus grande proportion de recherches montrant un impact positif de la RV sur l'apprentissage de la chimie lorsque ces contraintes sont intégrées pointe vers un meilleur apprentissage lorsque les élèves explorent eux-mêmes les contenus d'apprentissage, ce qui va dans le sens du principe de l'enquête guidée de la théorie de l'apprentissage cognitif multimédia. Par le fait même, cela renforce l'hypothèse de la modélisation, c'est-à-dire que les élèves peuvent apprendre avec plus de profondeur lorsqu'ils articulent l'expérience et les concepts, hypothèse vers laquelle pointe la meilleure proportion de recherches indiquant un impact positif pour les recherches intégrant une tâche de représentation et une intention d'apprentissage associé à la modélisation.

D'autre part, cette double tendance insinue également que les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie avec RV développent peu d'environnements adaptés aux besoins des élèves. En effet, l'absence d'intégration des contraintes didactiques de la modélisation dans la majorité des recherches retenues expose que la RV est majoritairement utilisée comme un environnement permettant l'illustration concrète des concepts théoriques dans l'enseignement magistral des structures chimiques. On peut ainsi dire que la RV est davantage utilisée comme une extension des animations plutôt que matrice permettant d'articuler les concepts à des expériences dans un système de communication. Cette utilisation de l'illustration, plutôt que de l'articulation, s'actualise par une majorité d'environnements virtuels présentant des modèles à apprendre, des apprentissages centrés sur les relations entre les connaissances théoriques et le langage chimique, et n'offrant pas de données à manipuler. D'un point de vue didactique, on pourrait reconnaître une utilisation classique de la méthode magistrale dans l'enseignement des modèles en chimie qui expose des contenus théoriques accompagnés par des exemples illustratifs. Tout se passe comme si on a simplement remplacé un substrat matériel par un autre informatique.

Cette utilisation a des conséquences qui se répercutent de façon globale sur la signification des caractéristiques de la modélisation dans l'enseignement-apprentissage de la chimie avec la RV. En effet, l'absence de contexte pratique où les élèves peuvent manipuler des données limite la possibilité de relier les connaissances théoriques et les connaissances empiriques. De même, l'absence de référence à des connaissances empiriques dans l'apprentissage de certains concepts empêche nécessairement leur articulation. Ces deux contraintes déconnectent l'interprétation des modèles scientifiques du référent empirique qu'ils devraient remplacer, empêchant le passage d'une description à partir d'idées quotidiennes aux descriptions à partir des concepts. Cette

déconnexion explique la quasi-absence de problème scientifique, puisque ces problèmes nécessitent l'explicitation des limites des explications des connaissances empiriques, qui ne peut avoir lieu si les connaissances empiriques ne sont pas mobilisées. De même, si les modèles sont déconnectés du référent empirique qu'ils expliquent, l'adaptation des modèles au contexte d'expérience devient impossible, et conséquemment, ils perdent tout potentiel évolutif, puisqu'ils ne peuvent être réfutés, modifiés ou limités à un contexte particulier. La déconnexion du modèle et du référent empirique explique donc également la quasi-absence de modèles scientifiques d'un point de vue épistémologique.

Pourtant, tant la théorie de l'apprentissage cognitif multimédia, basée sur le principe d'apprentissage génératif, que la théorie de l'apprentissage situé (« situated learning ») mettent en exergue la nécessité d'un contexte concret dans lequel ancrer l'apprentissage et d'une analyse globale d'une représentation des savoirs liés à ce contexte pour que la technologie favorise l'apprentissage. La négligence de ces deux principes dans les recherches sur l'enseignement-apprentissage de la chimie illustre qu'on attribue aux technologies immersives un potentiel facilitateur d'apprentissage lié aux perceptions sensibles des élèves, comme la facilitation de la visualisation spatiale ou l'immersion dans une expérience, alors que des recherches récentes indiquent que ces variables n'ont qu'un effet indirect sur le processus de réflexion de l'élève, et par conséquent pas d'effet direct sur les apprentissages scolaires (Huang et al., 2022). De plus, cette idée fait fi de l'impact des relations entre l'activité de l'élève et de la nature du savoir avec l'apprentissage à réaliser. Elle relègue donc au second plan la question de la correspondance entre les contraintes didactiques et technologiques, alors que les recherches tendent à confirmer

l'importance de l'harmonie entre les contraintes technologiques et didactiques (Klingenberg et al., 2020).

Il est toutefois nécessaire de noter que cette déconnexion est surtout visible dans l'enseignement des structures chimiques. Les recherches portant sur l'apprentissage d'interactions chimiques, comme la neutralisation acidobasique, les lois des gaz parfaits et la chromatographie ont en effet généralement intégré l'articulation de connaissances empiriques, théoriques et un système de communication dans les activités d'apprentissage. De plus, dans la plupart de ces recherches, la RV a été utilisée comme une matrice de données dans lesquelles les élèves pouvaient apprendre en analysant les conséquences de leurs actions sur l'environnement virtuel. Par ailleurs, les recherches sur l'apprentissage de la production de DME et des transformations chimiques ont articulé des expériences et des connaissances théoriques sans passer par un système de communication, ce qui ne représente pas l'application de la modélisation, mais dénote quand même l'utilisation de la RV comme matrice de données. Par contre, l'ensemble de ces thèmes n'étaient pas abordés dans un nombre de recherches comparable aux structures chimiques. De facto, les résultats ne permettent d'associer l'impact de la RV sur les apprentissages aux thèmes abordés.

Enfin, il faut noter quelques limites à nos résultats. Premièrement, l'analyse a été faite sur la base des propos des auteurs, qui parfois n'explicitaient pas entièrement leurs résultats ou le déroulement de leur activité d'apprentissage. Cette limite a fait en sorte que certaines variables présentent des données manquantes. De plus, les recherches retenues concernaient l'enseignement de la chimie avec la RV. Ainsi, l'extrapolation de l'interprétation de ces résultats aux

environnements de RV conçus pour l'enseignement d'autres disciplines devrait être faite avec précaution.

À la fin de cette analyse, nous en concluons que les recherches sur l'enseignement de la chimie avec la RV, bien que nombreuses, n'intègrent que faiblement les contraintes d'une démarche fondamentale en chimie, à savoir la modélisation. Aujourd'hui encore, peu de plateformes en RV développées pour l'apprentissage de la chimie répondent réellement aux besoins des élèves sur le plan conceptuel, c'est-à-dire l'articulation de connaissances théoriques et empiriques pour donner sens aux modèles scientifiques. De là, une première avenue pour les recherches futures serait de comparer les apprentissages d'élèves qui réalisent une activité de modélisation dans une RV qui permet l'articulation de toutes les contraintes et ceux d'élèves dans une RV purement illustrative. Une autre avenue serait de modifier la nature de la RV pour la faire correspondre aux logiciels de modélisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbasi, I., Rasool, S., et Habib, U. (2023). Virtual reality as a medium of asynchronous content delivery for teaching about enzymes. *Journal of Chemical Education*, *100*(3), 1203-1210. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01113

Abdinejad, M., Ferrag, C., Qorbani, Hossain. S., et Dalili, S. (2021). Developing a simple and cost-effective markerless augmented reality tool for chemistry education. *Journal of Chemical Education*, *98*(5), 1783-1788. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00173

Abdinejad, M., Talaie, B., Qorbani, H. S., et Dalili, S. (2021). Student perceptions using augmented reality and 3d visualization technologies in chemistry education. *Journal of Science Education & Technology*, *30*(1), 87-96. https://doi.org/10.1007/s10956-020-09880-2

Abuhammad, A., Falah, J., Alfalah, S. F. M., Abu-Tarboush, M., Tarawneh, R. T., Drikakis, D., et Charissis, V. (2021). "MedChemVR": A virtual reality game to enhance medicinal chemistry education. *Multimodal Technologies and Interaction*, *5*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/mti5030010

Akçayır, M., et Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, *20*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002

Aldalalah, O. (Mohammad A., Ababneh, Z. W. M., Bawaneh, A. K., et Alzubi, W. M. M. (2019). Effect of augmented reality and simulation on the achievement of mathematics and visual

thinking among students. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, *14*(18), 164-185. https://doi.org/10.3991/ijet.v14i18.10748

Arican, M., et Özçakir, B. (2021). Facilitating the development of Preservice teachers' proportional reasoning in geometric similarity problems using augmented reality activities. *Education and Information Technologies*, *26*(2), 2327-2353. https://doi.org/10.1007/s10639-020-10359-1

Astolfi, J.-P. (2008). *La saveur des savoirs. Disciplines et plaisir d'apprendre*. ESF éditeur.

Astolfi, J.-P., et Drouin, A.-M. (1992). La modélisation à l'école élémentaire. Dans J.-L. Martinand, *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (1ère, p. 55-117). Institut National de Recherche Pédagogique.

Astolfi, J.-P., et Peterfalvi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, *16*(16), 103-141. https://doi.org/10.4267/2042/8578

Astuti, T. N., Sugiyarto, K. H., et Ikhsan, J. (2020). Effect of 3D visualization on students' critical thinking skills and scientific attitude in chemistry. *International Journal of Instruction*, *13*(1), 151-164. https://doi.org/10.29333/iji.2020.13110a

Aylward, K., Dahlman, J., Nordby, K., et Lundh, M. (2021). Using operational scenarios in a virtual reality enhanced design process. *Education Sciences*, *11*. https://eric.ed.gov/?id=EJ1307377

Bakar, I. S. A., Sugiyarto, K. H., et Ikhsan, J. (2019). The utilization of virtual reality on development of three dimensional visualisation on chemistry subject. *International Journal on New Trends in Education and their Implications (IJONTE)*, *10*(3), 47-54.

Ballini, P., Robardet, G., et Rolando, J.-M. (1997). L'intuition, obstacle à l'acquisition de concepts scientifiques : Propositions pour l'enseignement du concept d'énergie en Première S. *Aster*, *24*(24, p. 231). https://doi.org/10.4267/2042/8670

Bardin, L. (2013). L'organisation de l'analyse. Dans *L'analyse de contenu* (2e éd., p. 125-133). Presses Universitaires de France. https://www.cairn.info/l-analyse-de-contenu--9782130627906-p-268.htm

Beaufils, D. (2009). Le modèle et son phénoménographe. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*, *48*(1), 15-38.

Bernholt, S., Broman, K., Siebert, S., et Parchmann, I. (2019). Digitising teaching and learning – additional perspectives for chemistry education. *Israel Journal of Chemistry*, *59*(6), 554-564. Scopus. https://doi.org/10.1002/ijch.201800090

Björn, M. H., Ravyse, W., Botha-Ravyse, C., Laurila, J. M., et Keinonen, T. (2021). A revised pedagogy model for simulator-based training with biomedical laboratory science students. *Education Sciences*, *11*. https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eric&AN=EJ1304134&site=ehost-live

Boo, H.-K., et Watson, J. R. (2001). Progression in high school students' (aged 16–18) conceptualizations about chemical reactions in solution. *Science Education*, *85*(5), 568-585. https://doi.org/10.1002/sce.1024

BouJaoude, S., et Barakat, H. (2003). Students' problem solving strategies in stoichiometry and their relationships to conceptual understanding and learning approaches. *The Electronic*

Journal for Research in Science and Mathematics Education, *7*(3). https://ejrsme.icrsme.com/article/view/7709

Brown, C. E., Alrmuny, D., Williams, M. K., Whaley, B., et Hyslop, R. M. (2021). Visualizing molecular structures and shape : A comparison of virtual reality, computer simulation, and traditional modeling. *Chemistry Teacher International*, *3*(1), 69-80. https://doi.org/10.1515/cti-2019-0009

Cai, S., Liu, C., Wang, T., Liu, E., et Liang, J. (2021). Effects of learning physics using augmented reality on students' self-efficacy and conceptions of learning. *British Journal of Educational Technology*, *52*(1), 235-251. https://doi.org/10.1111/bjet.13020

Cai, S., Wang, X., et Chiang, F.-K. (2014). A case study of augmented reality simulation system application in a chemistry course. *Computers in Human Behavior*, *37*, 31-40. https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.04.018

Cakmakci, G. (2010). Identifying Alternative Conceptions of Chemical Kinetics among Secondary School and Undergraduate Students in Turkey. *Journal of Chemical Education*, *87*(4), 449-455. https://doi.org/10.1021/ed8001336

Canac, S. et Kermen, I. (2018). Les difficultés des élèves face au langage de la chimie. Dans I. Kermen (dir.), *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée : savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes* (p. 173-187). Rennes, France : Presses universitaire de Rennes.

Chang, H.-Y., Liang, J.-C., et Tsai, C.-C. (2020). Students' context-specific epistemic justifications, prior knowledge, engagement, and socioscientific reasoning in a mobile

augmented reality learning environment. *Journal of Science Education and Technology*, *29*(3), 399-408. https://doi.org/10.1007/s10956-020-09825-9

Chang, H.-Y., Wu, H.-K., et Hsu, Y.-S. (2013). Integrating a mobile augmented reality activity to contextualize student learning of a socioscientific issue. *British Journal of Educational Technology*, *44*(3), E95-E99. https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2012.01379.x

Chang, Y.-S. (2021). Effects of virtual reality application on skill learning for optical-fibre fusion splicing. *British Journal of Educational Technology*, *52*(6), 2209-2226. https://doi.org/10.1111/bjet.13118

Chao, J., Chiu, J., DeJaegher, C., et Pan, E. (2016). Sensor-augmented virtual labs: using physical interactions with science simulations to promote understanding of gas behavior. *Journal of Science Education and Technology*, *25*(1), 16-33. https://doi.org/10.1007/s10956-015-9574-4

Cheng, M. M. W. (2018). Students' visualisation of chemical reactions – insights into the particle model and the atomic model. *Chemistry Education Research and Practice*, *19*(1), 227-239. https://doi.org/10.1039/C6RP00235H

Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes : why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences*, *14*(2), 161-199. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1402_1

Chi, M. T. H., Roscoe, R. D., Slotta, J. D., Roy, M., et Chase, C. C. (2012). Misconceived causal explanations for emergent processes. *Cognitive Science*, *36*(1), 1-61. https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2011.01207.x

Chittleborough, G. D., Treagust, D. F., Mamiala, T. L., et Mocerino, M. (2005). students' perceptions of the role of models in the process of science and in the process of learning. *Research in Science and Technological Education*, *23*(2), 195-212.

Chiu, M.-H., Chou, C.-C., Chen, Y.-H., Hung, T., Tang, W.-T., Hsu, J.-W., Liaw, H. L., et Tsai, M.-K. (2019). Model-based learning about structures and properties of chemical elements and compounds via the use of augmented realities. *Chemistry Teacher International*, *1*(1). https://doi.org/10.1515/cti-2018-0002

Chomat, A., Larcher, C., et Méheut, M. (1992). Modèle particulaire et démarches de modélisation. Dans J.-L. Martinand, *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (1ère, p. 119-170). Institut National de Recherche Pédagogique.

Coll, R. K., et Treagust, D. F. (2001). learners' mental models of chemical bonding. *Research in Science Education*, *31*(3), 357-382. https://doi.org/10.1023/A:1013159927352

Cox, M. (2012). Informatique et apprentissage des sciences : Tendances, dilemmes et conséquences pour l'avenir. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *6*, Article 6. https://doi.org/10.4000/rdst.84

Crandall, P. G., Engler, R. K., Beck, D. E., Killian, S. A., O'Bryan, C. A., Jarvis, N., et Clausen, E. (2015). Development of an augmented reality game to teach abstract concepts in food chemistry. *Journal of Food Science Education*, *14*(1), 18-23. https://doi.org/10.1111/1541-4329.12048

Dalgarno, B., et Lee, M. J. W. (2010). What are the learning affordances of 3-D virtual environments? *British Journal of Educational Technology*, *41*(1), 10-32. https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2009.01038.x

Dawley, L., et Dede, C. (2014). Situated learning in virtual worlds and immersive simulations. Dans J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen, et M. J. Bishop (Éds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (p. 723-734). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_58

Dehon, J. (2018). *L'équation chimique, un sujet d'étude pour diagnostiquer les difficultés d'apprentissage de la langue symbolique des chimistes dans l'enseignement secondaire belge* [Thèse de doctorat en Sciences, Université de Namur]. https://pure.unamur.be/ws/portalfiles/portal/38343652/2018_DehonJ_these.pdf

Dehon, J., et Snauwaert, P. (2015). L'équation de réaction : Une équation à plusieurs inconnues. Étude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *12*, Article 12.

Dukerich, L. (2015). Applying modeling instruction to high school chemistry to improve students' conceptual understanding. *Journal of Chemical Education*, *92*(8), 1315-1319. https://doi.org/10.1021/ed500909w

Dunleavy, M., et Dede, C. (2014). Augmented reality teaching and learning. Dans J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen, et M. J. Bishop (Éds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (p. 735-745). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_59

El Bilani, R. (2007). *Nature des connaissances mises en jeu par les élèves et les enseignants lors de l'utilisation des TICE en chimie- cas de la réaction chimique dans l'enseignement secondaire* [Thèse de doctorat en Sciences de l'Éducation, Université Lyon-2 et Université libanaise]. https://usherbrooke-

my.sharepoint.com/personal/lacn2806_usherbrooke_ca/Documents/Pi%C3%A8ces%20jointes/el-bilani_r.pdf

Elford, D., Lancaster, S. J., et Jones, G. A. (2022). Exploring the effect of augmented reality on cognitive load, attitude, spatial ability, and stereochemical perception. *Journal of Science Education and Technology*, *31*(3), 322-339. https://doi.org/10.1007/s10956-022-09957-0

Elswick, J., et Lennex, L. (2017). *Technology Use in Secondary Chemistry and Physics Classrooms in Kentucky*. 2097-2099. https://www-learntechlib-org.ezproxy.usherbrooke.ca/primary/p/177503/

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

Fiorella, L., et Mayer, R. E. (2021). The generative activity principle in multimedia learning. Dans L. Fiorella et R. E. Mayer (Éds.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (3e éd., p. 339-350). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108894333.036

Fourez, G. (2007). Knowledge as representation. Dans M. Larochelle (Éd.), *Key works in radical constructivism* (p. 259-266). Sense Publishers.

Fowler, C. (2015). Virtual reality and learning: Where is the pedagogy? *British Journal of Educational Technology*, *46*(2), 412-422. https://doi.org/10.1111/bjet.12135

Frevert, M., et Di Fuccia, D.-S. (2021). Possibilities of learning contemporary chemistry via virtual reality. *World Journal of Chemical Education*, *9*(1), 1-7. Scopus. https://doi.org/10.12691/wjce-9-1-1

Fuller, R. B. (2010). *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial « Terre ».* (R. Pelletier et G. Khal trad). Baden, Suisse : Lars Müller Publishers (ouvrage original publié en 1969).

Garcia-Bonete, M., Jensen, M., et Katona, G. (2019). A practical guide to developing virtual and augmented reality exercises for teaching structural biology. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, *47*(1), 16-24. https://doi.org/10.1002/bmb.21188

Garzón, J., et Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of augmented reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, *27*, 244-260. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001

Gauthier, B. (2016). La structure de la preuve. Dans B. Gauthier et I. Bourgeois, *Recherche sociale : De la problématique à la collecte de données* (6e éd., p. 161-193). Presses de l'Université du Québec.

Genzling, J.-M., et Pierrard, M.-A. (1994). La modélisation, la description, l'explication et la prédiction. Dans J.-L. Martinand, *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation* (1ère, p. 47-77). Institut National de Recherche Pédagogique.

Gouvernement du Québec. (2011). *Progression des apprentissages au secondaire : Sciences et technologies*. Québec, Canada : Ministère de l'Éducation, des Loisirs et du Sport. http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/education/jeunes/pfeq/PDA_PFEQ_science-technologie-secondaire_2011.pdf

Gouvernement du Québec. (2012). *Programme de formation de l'école québécoise : Enseignement secondaire, deuxième cycle domaine des mathématiques, sciences et technologies*. Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur.

www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/education/jeunes/pfeq/PFEQ_science-technologie-deuxieme-cycle-secondaire.pdf

Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., et Smith, C. L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, *28*(9), 799-822. https://doi.org/10.1002/tea.3660280907

Gün, E. T., et Atasoy, B. (2017). The effects of augmented reality on elementary school students' spatial ability and academic achievement. *Education and Science / Egitim ve Bilim*, *42*(191), 31-51. https://doi.org/10.15390/EB.2017.7140

Habig, S. (2020). Who can benefit from augmented reality in chemistry? Sex differences in solving stereochemistry problems using augmented reality. *British Journal of Educational Technology*, *51*(3), 629-644. https://doi.org/10.1111/bjet.12891

Haigh, M., France, B., et Gounder, R. (2012). Compounding confusion? When illustrative practical work falls short of its purpose-A case study. *Research in Science Education*, *42*(5), 967-984.

Harrison, A. G., et Treagust, D. F. (1996). Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for teaching chemistry. *Science Education*, *80*(5), 509-534. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199609)80:5<509::AID-SCE2>3.0.CO;2-F

Harrison, A. G., et Treagust, D. F. (2001). Conceptual change using multiple interpretive perspectives : Two case studies in secondary school chemistry. *Instructional Science*, *29*(1), 45-85.

Hidayah, F. F., Imaduddin, M., Praptaningrum, D. N. W., et Ristanti, D. A. (2020). Cogenerative dialogue of cross-generation educators to improve chemistry teaching quality through

technology. *Journal for the Education of Gifted Young Scientists*, *8*(1), 465-487. https://doi.org/10.17478/jegys.654941

Huang, W., Roscoe, R. D., Craig, S. D., et Johnson-Glenberg, M. C. (2022). Extending the cognitive-affective theory of learning with media in virtual reality learning: A structural equation modeling approach. *Journal of Educational Computing Research*, *60*(4), 807-842. https://doi.org/10.1177/07356331211053630

Hu-Au, E., et Okita, S. (2021). Exploring differences in student learning and behavior between real-life and virtual reality chemistry laboratories. *Journal of Science Education and Technology*, *30*(6), 862-876. https://doi.org/10.1007/s10956-021-09925-0

Ifinedo, E., et Rikala, J. (2019). *TPACK and educational interactions – Pillars of successful technology integration*. 295-305. https://www-learntechlib-org.ezproxy.usherbrooke.ca/primary/p/211094/

Iordache, D. D. (2021). Educational value of a virtual reality laboratory – Focus group with students. *eLearning and Software for Education*, *1*, 182-187. https://doi.org/10.12753/2066-026X-21-024

Jagodziński, P., et Wolski, R. (2015). Assessment of application technology of natural user interfaces in the creation of a virtual chemical laboratory. *Journal of Science Education & Technology*, *24*(1), 16-28. https://doi.org/10.1007/s10956-014-9517-5

Johnson-Glenberg, M. C., Birchfield, D. A., Tolentino, L., et Koziupa, T. (2014). Collaborative embodied learning in mixed reality motion-capture environments : Two science studies. *Journal of Educational Psychology*, *106*(1), 86-104. https://doi.org/10.1037/a0034008

Johnston, E., Olivas, G., Steele, P., Smith, C., et Bailey, L. (2018). Exploring pedagogical foundations of existing virtual reality educational applications: A content analysis study. *Journal of Educational Technology Systems*, *46*(4), 414-439. https://doi.org/10.1177/0047239517745560

Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching : A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, *70*(9), 701. https://doi.org/10.1021/ed070p701

Kavanagh, S., Luxton-Reilly, A., Wuensche, B., et Plimmer, B. (2017). A systematic review of Virtual Reality in education. *Themes in Science and Technology Education*, *10*(2), 85-119.

Kececi, G., Yildirim, P., et Zengin, F. K. (2021). Determining the effect of science teaching using mobile augmented reality application on the secondary school students' attitudes of toward science and technology and academic achievement. *Science Education International*, *32*(2), 137-148. https://doi.org/10.33828/sei.v32.i2.7

Keller, S., Rumann, S., et Habig, S. (2021). Cognitive load implications for augmented reality supported chemistry learning. *Information*, *12*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/info12030096

Kermen, I. (2018). Raisonnements d'élèves confrontés à l'évolution d'un système chimique. Dans *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée : Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes* (p. 71-102). Presses universitaire de Rennes.

Kermen, I., et Méheut, M. (2009). Different models used to interpret chemical changes: Analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. *Chemistry Education Research and Practice*, *10*(1), 24-34. https://doi.org/10.1039/B901457H

Kim, K. G., Oertel, C., Dobricki, M., Olsen, J. K., Coppi, A. E., Cattaneo, A., et Dillenbourg, P. (2020). Using immersive virtual reality to support designing skills in vocational education. *British Journal of Educational Technology*, *51*(6), 2199-2213. https://doi.org/10.1111/bjet.13026

Klingenberg, S., Jørgensen, M. L. M., Dandanell, G., Skriver, K., Mottelson, A., et Makransky, G. (2020). Investigating the effect of teaching as a generative learning strategy when learning through desktop and immersive VR : A media and methods experiment. *British Journal of Educational Technology*, *51*(6), 2115-2138. https://doi.org/10.1111/bjet.13029

Krug, M., et Huwer, J. (2023). Safety in the Laboratory—An Exit Game Lab Rally in Chemistry Education. *Computers*, *12*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/computers12030067

Kuit, V. K., et Osman, K. (2021). Chembond3d e-module effectiveness in enhancing students' knowledge of chemical bonding concept and visual-spatial skills. *European Journal of Science and Mathematics Education*, *9*(4), 252-264. Scopus. https://doi.org/10.30935/SCIMATH/11263

Larcher, C. (1994). Étude comparative de démarches de modélisation. Dans J.-L. Martinand, *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation* (p. 9-24). Institut National de Recherche Pédagogique.

Laugier, A., et Dumon, A. (2004). L'équation de réaction : Un noeud d'obstacles difficilement franchissable. *Chemistry Education Research and Practice*, *5*(1), 55-68.

Le Maréchal, J.-F., et Bécu-Robinault, K. (2006). La simulation en chimie au sein du projet Microméga®. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*, *43*(1), 81-107.

Lemeignan, G., et Weil-Barais, A. (1992). L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. Dans J.-L. Martinand, *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (1ère, p. 171-231). Institut National de Recherche Pédagogique.

Leopold, C. (2021). The Imagination Principle in Multimedia Learning. Dans L. Fiorella & R. E. Mayer (Éds.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (3e éd., p. 370-380). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108894333.039

Leray, C., et Bourgeois, I. (2016). L'analyse de contenu. Dans B. Gauthier et I. Bourgeois, *La recherche sociale : De la problématique à la collecte de données* (6e éd.). Presses de l'Université du Québec.

Lewis, F., Plante, P., et Lemire, D. (2021). Pertinence, efficacité et principes pédagogiques de la réalité virtuelle et augmentée en contexte scolaire : Une revue de littérature. *Médiations et médiatisations*, *5*, Article 5. https://doi.org/10.52358/mm.vi5.161

Ling, Y., Zhu, P., et Yu, J. (2021). Which types of learners are suitable for augmented reality? A fuzzy set analysis of learning outcomes configurations from the perspective of individual differences. *Educational Technology Research and Development*, *69*(6), 2985-3008. https://doi.org/10.1007/s11423-021-10050-3

Liou, H.-H., Yang, S. J. H., Chen, S. Y., et Tarng, W. (2017). The Influences of the 2D Image-Based Augmented Reality and Virtual Reality on Student Learning. *Journal of Educational Technology & Society*, *20*(3), 110-121.

Martinand, J.-L. (2002). Apprendre à modéliser. Dans R. Toussaint, *Changement conceptuel et apprentissage des sciences. Recherches et pratiques.* (p. 12). Éditions Logiques.

Martinand, J.-L. (2010). Schémas didactiques pour la modélisation en sciences et technologies. *Spectre*, *40*(1), 20-24.

Martinand, J.-L. (2014). Point de vue V – Didactique des sciences et techniques, didactique du curriculum. *Éducation et didactique*, *8*(8-1), Article 1. https://doi.org/10.4000/educationdidactique.1886

Martineau, S. (2016). L'observation directe. Dans B. Gauthier et I. Bourgeois, *Recherche sociale : De la problématique à la collecte de données* (6e éd., p. 315-335). Presses de l'Université du Québec.

Marzin-Janvier, P. (2013). *Comment donner du sens aux activités expérimentales ?* [Mémoire, Université Joseph-Fourier - Grenoble I]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00966001

Marzin-janvier, P. (2015). Étayer la conception expérimentale par des environnements informatiques : Études en génétique. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *12*, Article 12. https://doi.org/10.4000/rdst.1135

Marzin-janvier, P., et Kermen, I. (2015). L'expérimental réel ou virtuel en classe de sciences. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *12*, Article 12.

Mayer, R. E. (2014). Multimedia instruction. Dans J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen, et M. J. Bishop (Éds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (p. 385-399). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_31

Merino, C., Marzábal, A., Quiroz, W., Pino, S., López-Cortés, F., Carrasco, X., et Miller, B. G. (2022). Use of augmented reality in chromatography learning: How is this dynamic visual artifact fostering the visualization capacities of chemistry undergraduate students?

Frontiers in Education, *7*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2022.932713

Miller, M. D., Castillo, G., Medoff, N., et Hardy, A. (2021). Immersive VR for organic chemistry : Impacts on performance and grades for first-generation and continuing-generation university students. *Innovative Higher Education*, *46*(5), 565-589. https://doi.org/10.1007/s10755-021-09551-z

Morales, C. (2019). *Supporting Teachers in Technology Integration: Veteran teachers' reactions to technology*. 323-336. https://www-learntechlib-org.ezproxy.usherbrooke.ca/primary/p/211096/

Négrier, M., et Kermen, I. (2011). Quelle adéquation entre intentions didactiques d'un programme de chimie et des manuels scolaires ? *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *4*, Article 4.

Nesenbergs, K., Abolins, V., Ormanis, J., et Mednis, A. (2021). Use of augmented and virtual reality in remote higher education: A systematic umbrella review. *Education Sciences*, *11*.

Omar, M., Ali, D. F., Mokhtar, M., Zaid, N. M., Jambari, H., et Ibrahim, N. H. (2019). Effects of mobile augmented reality (MAR) towards students' visualization skills when learning orthographic projection. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, *14*(20), 106-119. https://doi.org/10.3991/ijet.v14i20.11463

Orange, C. (1994). Les modèles, de la mise en relation au fonctionnement. Dans J.-L. Martinand, *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation* (1ère, p. 25-43). Institut National de Recherche Pédagogique.

Orange, C. (2005). Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, *38*(3), 69-94. https://doi.org/10.3917/lsdle.383.0069

Orange, C. (2007). Spécificité de la problématisation scientifique : Le travail d'abstraction et de généralisation. *Recherches en éducation*, *3*, Article 3. http://journals.openedition.org/ree/3751

Orange Ravachol, D. (2016). Problèmes, modélisations et modèles dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences de la nature à dimension historique : Le cas des sciences de la vie et de la Terre (SVT). *Tréma*, *45*, Article 45. https://doi.org/10.4000/trema.3508

Pande, P., Thit, A., Sørensen, A. E., Mojsoska, B., Moeller, M. E., et Jepsen, P. M. (2021). Long-term effectiveness of immersive VR simulations in undergraduate science learning: Lessons from a media-comparison study. *Research in Learning Technology*, *29*. http://dx.doi.org/10.25304/rlt.v29.2482

Pandey, M., Choudhury, H., Verma, R. K., Bin Zainal Anuar, M. F., Baloch, H. Z., Nathan, S. S., Gunasegaran, T., et Kaur Ambar Jeet Singh, B. J. (2022). Augmented reality in laboratory: Perception student on the beneficial surface tension practical during pharmaceutics laboratory session. *ASEAN Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, *14*(2), 47-59. https://doi.org/10.17576/ajtlhe.1402.2022.04

Parong, J., et Mayer, R. E. (2018). Learning Science in Immersive Virtual Reality. *Journal of Educational Psychology*, *110*(6), 785-797. https://doi.org/10.1037/edu0000241

Pedaste, M., Mitt, G., et Jürivete, T. (2020). What is the effect of using mobile augmented reality in k12 inquiry-based learning? *Education Sciences*, *10*. https://eric.ed.gov/?id=EJ1251745

Peeters, H., Habig, S., et Fechner, S. (2023). Does augmented reality help to understand chemical phenomena during hands-on experiments?–Implications for cognitive load and learning. *Multimodal Technologies and Interaction*, *7*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/mti7020009

Peterson, C. N., Tavana, S. Z., Akinleye, O. P., Johnson, W. H., et Berkmen, M. B. (2020). An idea to explore: Use of augmented reality for teaching three-dimensional biomolecular structures. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, *48*(3), 276-282. https://doi.org/10.1002/bmb.21341

PhET-chimie. (2022). PhET. https://phet.colorado.edu/fr/simulations/browse

Pietikäinen, O., Hämäläinen, P., Lehtinen, J., et Karttunen, A. J. (2021). VRChem : A virtual reality molecular builder. *Applied Sciences*, *11*(22), Article 22. https://doi.org/10.3390/app112210767

Poland, R., Baggott la Velle, L., et Nichol, J. (2003). The Virtual Field Station (VFS) : Using a virtual reality environment for ecological fieldwork in A-Level biological studies-Case Study 3: The Virtual Field Station. *British Journal of Educational Technology*, *34*(2), 215-231. https://doi.org/10.1111/1467-8535.00321

Pradani, N., Munzil, et Muchson, M. (2020). Development of guided inquiry based learning materials enriched with augmented reality in electrolysis cell material. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, *14*(12), 4-15. Scopus. https://doi.org/10.3991/IJIM.V14I12.15597

Riopel, M., Raîche, G., Potvin, P., Fournier, F., et Nonnon, P. (2006). Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*, *43*(1), 57-79.

Ripsam, M., et Nerdel, C. (2022). Augmented reality for chemistry education to promote the use of chemical terminology in teacher trainings. *Frontiers in Psychology*, *13*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.1037400

Roy, P., et Hasni, A. (2014). Les modèles et la modélisation vus par des enseignants de sciences et technologies du secondaire au Québec. *Revue des sciences de l'éducation de McGill*, *49*(2), 349-371. https://doi.org/10.7202/1029424ar

Ruthven, K., Laborde, C., Leach, J., et Tiberghien, A. (2009). Design tools in didactical research: Instrumenting the epistemological and cognitive aspects of the design of teaching sequences. *Educational Researcher*, *38*(5), 329-342. https://doi.org/10.3102/0013189X09338513

Salta, K., et Tzougraki, C. (2011). Conceptual versus algorithmic problem-solving : Focusing on problems dealing with conservation of matter in chemistry. *Research in Science Education*, *41*(4), 587-609.

Seibert, J., Marquardt, M., Pinkle, S., Carbon, A., Lang, V., Heuser, K., Perels, F., Huwer, J., et Kay, C. W. M. (2020). Linking learning tools, learning companion and experimental tools in a multitouch learning book. *World Journal of Chemical Education*, *8*(1), 9-20. Scopus. https://doi.org/10.12691/wjce-8-1-2

Sellberg, C. (2017). Representing and enacting movement: The body as an instructional resource in a simulator-based environment. *Education and Information Technologies*, *22*(5), 2311-2332. https://doi.org/10.1007/s10639-016-9546-1

Silvennoinen, M., Helfenstein, S., Ruoranen, M., et Saariluoma, P. (2012). Learning basic surgical skills through simulator training. *Instructional Science*, *40*(5), 769-783. https://doi.org/10.1007/s11251-012-9217-6

Slotta, J. D., Chi, M. T. H., et Joram, E. (1995). Assessing students' misclassifications of physics concepts: An ontological basis for conceptual change. *Cognition and Instruction*, *13*(3), 373-400. https://doi.org/10.1207/s1532690xci1303_2

Suleman, M., Sugiyarto, K. H., & Ikhsan, J. (2019). Development of media three-dimensional (3D) visualization using virtual reality on chemistry education. *Journal of Physics: Conference Series*, *1397*(1), 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1397/1/012034

Suprapto, N., Nandyansah, W., & Mubarok, H. (2020). An Evaluation of the « PicsAR » Research Project: An Augmented Reality in Physics Learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, *15*(10), 113-125. https://doi.org/10.3991/ijet.v15i10.12703

Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet : Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, *14*(2), 156-168. https://doi.org/10.1039/C3RP00012E

Tai, R. H., Ward, R. B., et Sadler, P. M. (2006). High school chemistry content background of introductory college chemistry students and its association with college chemistry grades. *Journal of Chemical Education*, *83*(11), 1703-1711. https://doi.org/10.1021/ed083p1703

Thornton, T., et Lammi, M. (2021). An exploration of augmented reality in an introductory engineering graphics course. *Journal of Technology Education*, *32*(2), 38-55. https://doi.org/10.21061/jte.v32i2.a.3

Tiberghien, A., Vince, J., et Gaidioz, P. (2009). Design-based research : Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, *31*(17), 2275-2314. https://doi.org/10.1080/09500690902874894

Topraklikoglu, K., et Ozturk, G. (2021). Teaching geometry through augmented reality activities using three-dimensional modelling. *International Online Journal of Educational Sciences*, *13*(5), 1325-1342. https://doi.org/10.15345/iojes.2021.05.003

Tyson, L., Treagust, D. F., et Bucat, R. B. (1999). The complexity of teaching and learning chemical equilibrium. *Journal of Chemical Education*, *76*(4), 554-558. https://doi.org/10.1021/ed076p554

van Dinther, R., de Putter, L., et Pepin, B. (2023). Features of Immersive Virtual Reality to Support Meaningful Chemistry Education. *Journal of Chemical Education*, *100*(4), 1537-1546. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01069

Vosniadou, S. (2013). Conceptual change in learning and instruction: The framework theory approach. Dans S. Vosniadou (Éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2ème, p. 11-30). Routledge.

Wang, C.-Y., et Barrow, L. H. (2013). Exploring conceptual frameworks of models of atomic structures and periodic variations, chemical bonding, and molecular shape and polarity: A comparison of undergraduate general chemistry students with high and low levels of

content knowledge. *Chemistry Education Research and Practice*, *14*(1), 130-146. https://doi.org/10.1039/C2RP20116J

Wang-Kin, C. (2021). Pedagogy of emerging technologies in chemical education during the era of digitalization and artificial intelligence: A systematic review. *Education Sciences*, *11*(11), 709. http://dx.doi.org/10.3390/educsci11110709

Watson, J. R., Prieto, T., et Dillon, J. S. (1997). Consistency of students' explanations about combustion. *Science Education*, *81*(4), 425-443. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4<425::AID-SCE4>3.0.CO;2-E

Wu, F., Lu, W., Wang, X., Yang, J., Li, C., Cheng, L., et Xie, Z. (2022). Enhanced virtual reality plant : Development and application in chemical engineering education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, *17*(14), 205-220. https://doi.org/10.3991/ijet.v17i14.23407

Wulandari, I., Irwansyah, F. S., Farida, I., et Ramdhani, M. A. (2019). *Development of student's submicroscopic representation ability on molecular geometry material using Augmented Reality (AR) media*. *1280*(3). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1280/3/032016

Yalçinkaya, E., Özgecan, T., et Yezdan, B. (2009). High school students' conceptions about energy in chemical reactions. *Pamukkale University Journal of Education*, *26*(26), 1-11.

Yoon, S. A., Anderson, E., Lin, J., et Elinich, K. (2017). How augmented reality enables conceptual understanding of challenging science content. *Journal of Educational Technology and Society*, *20*(1), 156-166.

Zhao, J., Lin, L., Sun, J., et Liao, Y. (2020). Using the Summarizing Strategy to Engage Learners: Empirical Evidence in an Immersive Virtual Reality Environment. *Asia-Pacific Education*

Researcher (Springer Science and Business Media B.V.), *29*(5), 473-482. https://doi.org/10.1007/s40299-020-00499-w

Zhao, R., Chu, Q., et Chen, D. (2022). Exploring chemical reactions in virtual reality. *Journal of Chemical Education*, *99*(4), 1635-1641. Scopus. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c01040

ANNEXE A. GRILLE D'ANALYSE UTILISÉE

A. CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCRIT

Référence de l'écrit:

1. **Niveau scolaire considéré**

Primaire	
Secondaire	
Collégial	
Universitaire (général)	
Universitaire (professionnel)	
Formation initiale des enseignants	
Formation continue des enseignants	
Aucun niveau spécifié	
Autre (précisez)	

Préciser le système d'éducation (ex. : système français)?

Précisez :

Commentaires personnels

B. DESCRIPTION DES OBJETS D'APPRENTISSAGE ET DES ASPECTS TRAITÉS DANS LA RV

2. **Thème de l'activité**

Chimie organique
Neutralisation acidobasique
Stœchiométrie
Réaction de précipitation
Combustion
Loi des gaz parfaits

3. **Les volets ciblés par l'utilisation de la RV dans l'article :cognition, affects, perceptions sensorielles, etc.**
    1. **Décrire tous les aspects évoqués par l'auteur :**

4. **Identifier les aspects qui sont réellement traités dans la recherche**

5. **Les objets d'apprentissage traités (savoirs, habiletés, attitudes, démarches)**

Savoirs :

Savoir-faire :

Attitudes :

Démarche :

6. **Structure du savoir à apprendre : Quelles sont les relations conceptuelles établies entre les savoirs dans l'activité (relation macroscopique-microscopique, relation empirique-macroscopique, etc.)?**

C. NATURE DES LIENS ENTRE LES APPRENTISSAGES DISCIPLINAIRES ET LA RV

7. **Si l'auteur fait des liens entre les difficultés ou le potentiel d'apprentissage et une ou des caractéristiques de la RV, indiquez ce qu'il en dit**

Notez toutes les difficultés évoquées par l'auteur même si celles-ci sont implicites, nombreuses, incompréhensible (copier-coller)

8. **Rôle du savoir dans l'activité. Décrire comment la mobilisation du savoir influence la réalisation de l'activité (Le savoir permet-il la résolution d'un problème? S'agit-il d'une réponse à découvrir?).**

9. **Y a-t-il un modèle explicité dans l'activité?**

Oui

Non

10. **Si oui, quelle est sa place dans l'activité**

Produit d'activité d'apprentissage (le modèle est le produit final)
Moyen d'apprentissage (le modèle est mobilisé pour l'interprétation des données, la formulation d'hypothèses, etc.)
Visée d'apprentissage (le modèle est présenté dès le départ et n'est pas questionné)
Autres (précisez)

11. **Décrivez le modèle le plus fidèlement possible**

Commentaires personnels

D. RÔLE DE LA REPRÉSENTATION DANS L'ACTIVITÉ

12. **Tâche de représentation : L'activité met-elle en jeu une tâche de représentation?**

Oui
Non

13. **Si oui, à quel moment est-elle introduite?**

Début de l'activité
Au cours de l'activité
À la fin de l'activité
Autres (précisez)

14. **Décrivez la tâche le plus fidèlement possible**

E. CONTEXTE DONNÉ À L'ACTIVITÉ

15. **Scénario (L'activité met-elle en jeu une situation pratique, un jeu de rôle, une expérience)**

16. **Relation entre le savoir et le contexte de l'activité : Comment le savoir est-il intégré au contexte de l'activité (le contexte est-il une source de données, une simulation de l'application du savoir)?**

17. **Problématisation : Le contexte de l'activité présente-t-il de façon implicite ou explicite un problème scientifique?**

18. **Conditions, contraintes liées à la mise en œuvre du dispositif**

Commentaires personnels

F. RÉSULTATS DE L'ACTIVITÉ SUR LES APPRENTISSAGES DES ÉLÈVES

19. **Les mesures d'apprentissage utilisés par les auteurs**

2. **Décrire les modalités d'évaluation d'apprentissage:**

5. **Identifier les impacts de l'activité sur les apprenants**

Commentaires personnels

G. SYNTHÈSE

20. **Globalement, les contraintes de la modélisation sont-elles prises en compte? De quelle façon?**

ANNEXE B. LISTE DES RECHERCHES RETENUES

Abbasi, I., Rasool, S., & Habib, U. (2023). Virtual Reality as a Medium of Asynchronous Content Delivery for Teaching about Enzymes. Journal of Chemical Education, 100(3), 1203-1210. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01113

Abdinejad, M., Ferrag, C., Qorbani, Hossain. S., & Dalili, S. (2021). Developing a Simple and Cost-Effective Markerless Augmented Reality Tool for Chemistry Education. Journal of Chemical Education, 98(5), 1783-1788. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00173

Abdinejad, M., Talaie, B., Qorbani, H. S., & Dalili, S. (2021). Student Perceptions Using Augmented Reality and 3D Visualization Technologies in Chemistry Education. Journal of Science Education & Technology, 30(1), 87-96. https://doi.org/10.1007/s10956-020-09880-2

Abuhammad, A., Falah, J., Alfalah, S. F. M., Abu-Tarboush, M., Tarawneh, R. T., Drikakis, D., & Charissis, V. (2021). "MedChemVR" : A Virtual Reality Game to Enhance Medicinal Chemistry Education. Multimodal Technologies and Interaction, 5(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/mti5030010

Astuti, T. N., Sugiyarto, K. H., & Ikhsan, J. (2020). Effect of 3D Visualization on Students' Critical Thinking Skills and Scientific Attitude in Chemistry. International Journal of Instruction, 13(1), 151-164. https://doi.org/10.29333/iji.2020.13110a

Bakar, I. S. A., Sugiyarto, K. H., & Ikhsan, J. (2019). The Utilization of Virtual Reality on Development of Three Dimensional Visualisation on Chemistry Subject.

International Journal on New Trends in Education & their Implications (IJONTE), 10(3), 47-54.

Bernholt, S., Broman, K., Siebert, S., & Parchmann, I. (2019). Digitising Teaching and Learning – Additional Perspectives for Chemistry Education. Israel Journal of Chemistry, 59(6), 554-564. Scopus. https://doi.org/10.1002/ijch.201800088

Brown, C. E., Alrmuny, D., Williams, M. K., Whaley, B., & Hyslop, R. M. (2021). Visualizing molecular structures and shapes : A comparison of virtual reality, computer simulation, and traditional modeling. Chemistry Teacher International, 3(1), 69-80. https://doi.org/10.1515/cti-2019-0009

Cai, S., Wang, X., & Chiang, F.-K. (2014). A case study of Augmented Reality simulation system application in a chemistry course. Computers in Human Behavior, 37, 31-40. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.04.018

Chao, J., Chiu, J., DeJaegher, C., & Pan, E. (2016). Sensor-Augmented Virtual Labs : Using Physical Interactions with Science Simulations to Promote Understanding of Gas Behavior. Journal of Science Education & Technology, 25(1), 16-33. https://doi.org/10.1007/s10956-015-9574-4

Chiu, M.-H., Chou, C.-C., Chen, Y.-H., Hung, T., Tang, W.-T., Hsu, J.-W., Liaw, H. L., & Tsai, M.-K. (2019). Model-based learning about structures and properties of chemical elements and compounds via the use of augmented realities. Chemistry Teacher International, 1(1). https://doi.org/10.1515/cti-2018-0001

Crandall, P. G., Engler, R. K., Beck, D. E., Killian, S. A., O'Bryan, C. A., Jarvis, N., & Clausen, E. (2015). Development of an Augmented Reality Game to Teach

Abstract Concepts in Food Chemistry. Journal of Food Science Education, 14(1), 18-23. https://doi.org/10.1111/1541-4329.12048

Elford, D., Lancaster, S. J., & Jones, G. A. (2022). Exploring the Effect of Augmented Reality on Cognitive Load, Attitude, Spatial Ability, and Stereochemical Perception. Journal of Science Education & Technology, 31(3), 322-339. https://doi.org/10.1007/s10956-022-09957-0

Frevert, M., & Di Fuccia, D.-S. (2021). Possibilities of Learning Contemporary Chemistry via Virtual Reality. World Journal of Chemical Education, 9(1), 1-7. Scopus. https://doi.org/10.12691/wjce-9-1-0

Garcia-Bonete, M., Jensen, M., & Katona, G. (2019). A practical guide to developing virtual and augmented reality exercises for teaching structural biology. Biochemistry & Molecular Biology Education, 47(1), 16-24. https://doi.org/10.1002/bmb.21188

Habig, S. (2020). Who can benefit from augmented reality in chemistry? Sex differences in solving stereochemistry problems using augmented reality. British Journal of Educational Technology, 51(3), 629-644. https://doi.org/10.1111/bjet.12891

Hidayah, F. F., Imaduddin, M., Praptaningrum, D. N. W., & Ristanti, D. A. (2020). Cogenerative Dialogue of Cross-Generation Educators to Improve Chemistry Teaching Quality through Technolog. Journal for the Education of Gifted Young Scientists, 8(1), 465-487. https://doi.org/10.17478/jegys.654941

Hu-Au, E., & Okita, S. (2021). Exploring Differences in Student Learning and Behavior Between Real-life and Virtual Reality Chemistry Laboratories. Journal of Science

Education & Technology, 30(6), 862-876. https://doi.org/10.1007/s10956-021-09925-1

Iordache, D. D. (2021). Educational Value of a Virtual Reality Laboratory – Focus Group with Students. eLearning & Software for Education, 1, 182-187. https://doi.org/10.12753/2066-026X-21-024

Jagodziński, P., & Wolski, R. (2015). Assessment of Application Technology of Natural User Interfaces in the Creation of a Virtual Chemical Laboratory. Journal of Science Education & Technology, 24(1), 16-28. https://doi.org/10.1007/s10956-014-9517-5

Johnson-Glenberg, M. C., Birchfield, D. A., Tolentino, L., & Koziupa, T. (2014). Collaborative Embodied Learning in Mixed Reality Motion-Capture Environments : Two Science Studies. Journal of Educational Psychology, 106(1), 86-104. https://doi.org/10.1037/a0034008

Keller, S., Rumann, S., & Habig, S. (2021). Cognitive Load Implications for Augmented Reality Supported Chemistry Learning. Information, 12(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/info12030096

Krug, M., & Huwer, J. (2023). Safety in the Laboratory—An Exit Game Lab Rally in Chemistry Education. Computers, 12(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/computers12030067

Kuit, V. K., & Osman, K. (2021). Chembond3d e-module effectiveness in enhancing students' knowledge of chemical bonding concept and visual-spatial skills. European Journal of Science and Mathematics Education, 9(4), 252-264. Scopus. https://doi.org/10.30935/SCIMATH/11263

Ling, Y., Zhu, P., & Yu, J. (2021). Which types of learners are suitable for augmented reality? A fuzzy set analysis of learning outcomes configurations from the perspective of individual differences. Educational Technology Research & Development, 69(6), 2985-3008. https://doi.org/10.1007/s11423-021-10050-3

Merino, C., Marzábal, A., Quiroz, W., Pino, S., López-Cortés, F., Carrasco, X., & Miller, B. G. (2022). Use of augmented reality in chromatography learning : How is this dynamic visual artifact fostering the visualization capacities of chemistry undergraduate students? Frontiers in Education, 7. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2022.932713

Miller, M. D., Castillo, G., Medoff, N., & Hardy, A. (2021). Immersive VR for Organic Chemistry : Impacts on Performance and Grades for First-Generation and Continuing-Generation University Students. Innovative Higher Education, 46(5), 565-589. https://doi.org/10.1007/s10755-021-09551-z

Pandey, M., Choudhury, H., Verma, R. K., Bin Zainal Anuar, M. F., Baloch, H. Z., Nathan, S. S., Gunasegaran, T., & Kaur Ambar Jeet Singh, B. J. (2022). Augmented Reality in Laboratory : Perception Student on the Beneficial Surface Tension Practical During Pharmaceutics Laboratory Session. ASEAN Journal of Teaching & Learning in Higher Education, 14(2), 47-59. https://doi.org/10.17576/ajtlhe.1402.2022.04

Peeters, H., Habig, S., & Fechner, S. (2023). Does Augmented Reality Help to Understand Chemical Phenomena during Hands-On Experiments?–Implications for Cognitive Load and Learning. Multimodal Technologies and Interaction, 7(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/mti7020008

Peterson, C. N., Tavana, S. Z., Akinleye, O. P., Johnson, W. H., & Berkmen, M. B. (2020). An idea to explore : Use of augmented reality for teaching three-dimensional biomolecular structures. Biochemistry & Molecular Biology Education, 48(3), 276-282. https://doi.org/10.1002/bmb.21340

Pietikäinen, O., Hämäläinen, P., Lehtinen, J., & Karttunen, A. J. (2021). VRChem : A Virtual Reality Molecular Builder. Applied Sciences, 11(22), Article 22. https://doi.org/10.3390/app112210767

Pradani, N., Munzil, & Muchson, M. (2020). Development of guided inquiry based learning materials enriched with augmented reality in electrolysis cell material. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 14(12), 4-15. Scopus. https://doi.org/10.3991/IJIM.V14I12.15597

Ripsam, M., & Nerdel, C. (2022). Augmented reality for chemistry education to promote the use of chemical terminology in teacher trainings. Frontiers in Psychology, 13. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.1037400

Seibert, J., Marquardt, M., Pinkle, S., Carbon, A., Lang, V., Heuser, K., Perels, F., Huwer, J., & Kay, C. W. M. (2020). Linking Learning Tools, Learning Companion and Experimental Tools in a Multitouch Learning Book. World Journal of Chemical Education, 8(1), 9-20. Scopus. https://doi.org/10.12691/wjce-8-1-2

Suleman, M., Sugiyarto, K. H., & Ikhsan, J. (2019). Development of Media Three-dimensional (3D) Visualization using Virtual Reality on Chemistry Education. Journal of Physics: Conference Series, 1397(1), 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1397/1/012034

van Dinther, R., de Putter, L., & Pepin, B. (2023). Features of Immersive Virtual Reality to Support Meaningful Chemistry Education. Journal of Chemical Education, 100(4), 1537-1546. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01067

Wu, F., Lu, W., Wang, X., Yang, J., Li, C., Cheng, L., & Xie, Z. (2022). Enhanced Virtual Reality Plant : Development and Application in Chemical Engineering Education. International Journal of Emerging Technologies in Learning, 17(14), 205-220. https://doi.org/10.3991/ijet.v17i14.23407

Wulandari, I., Irwansyah, F. S., Farida, I., & Ramdhani, M. A. (2019). Development of student's submicroscopic representation ability on molecular geometry material using Augmented Reality (AR) media. 1280(3). Scopus. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1280/3/032016

Zhao, R., Chu, Q., & Chen, D. (2022). Exploring Chemical Reactions in Virtual Reality. Journal of Chemical Education, 99(4), 1635-1641. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c01040