

Université de Montréal

Une analyse didactique de l'enseignement de la modélisation
Le cas du modèle particulière

Par
Frikia Cheikh

Département de didactique
Faculté des sciences de l'éducation

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Ph.D
en sciences de l'éducation, option didactique

Août 2020

© Frikia Cheikh, 2020

Cette thèse intitulée
Une analyse didactique de l'enseignement de la modélisation
Le cas du modèle particulaire

Présentée par
Frikia Cheikh

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes

Pierre Nonnon
Président-rapporteur

Marcel Thouin
Directeur de recherche

Diane Gauthier
Membre de jury

Ghislain Samson
Examineur externe

Serge J. Larivée
Représentant de la doyenne de la FÉS

Résumé

L'enseignement de la science présente plusieurs lacunes : des lacunes en lien avec le contenu scolaire, les activités scolaires et la nature de la science. Qu'en est-il de l'enseignement de la science au Québec par rapport à ces lacunes ? Pour répondre à ces questions, nous avons assimilé l'enseignement de la science à l'enseignement de la modélisation. En effet, « faire la science » revient essentiellement à une activité de modélisation, les scientifiques passent la majorité du temps à construire, à tester, à réviser et à utiliser des modèles scientifiques. Il est important de souligner que cette activité permet, d'une part, de construire les connaissances scientifiques et, d'autre part, de comprendre la nature de la science. Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'analyser l'enseignement de la modélisation au Québec en vue de déterminer ses lacunes. Pour préciser cet objectif, nous avons choisi le cas particulier du modèle particulaire, car il est fondamental à l'univers matériel.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, nous avons procédé en trois étapes. Dans la première étape, nous avons élaboré des critères de l'enseignement de la modélisation et de l'enseignement du modèle particulaire en s'appuyant sur plusieurs travaux de recherches effectués pour améliorer l'enseignement de la modélisation. Dans la deuxième étape, nous avons décrit l'enseignement de la modélisation tel que présenté dans le programme de formation au secondaire et l'enseignement du modèle particulaire tel que présenté dans le curriculum formel et auprès de certains enseignants. À la troisième étape, cette description a été analysée compte tenu des grilles élaborées à la première étape, ce qui a permis d'identifier plusieurs lacunes dans l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulaire.

Parmi ces lacunes, nous avons relevé l'absence de construction des modèles par les élèves et l'absence du principe de différenciation entre la réalité et le modèle qui l'explique. Ces deux lacunes sont également présentes dans le cas du modèle particulaire. Les élèves ne sont pas amenés à le construire. Son utilisation est inexistante dans le programme de formation et dans

la progression des apprentissages au premiers cycle, elle est ambiguë dans les manuels du premier cycle et partielle au deuxième cycle. Les activités qui lui sont associées sont essentiellement des activités de mémorisation et de compréhension des concepts. Ces activités, qui ne sont pas des activités de modélisation, ne permettent pas vraiment de « faire la science » ni de comprendre la nature des modèles et de la science en général. De plus, les énoncés du modèle particulière sont partiels de sorte que le modèle particulière ne semble pas une idée centrale à laquelle plusieurs concepts sont reliés. Ces derniers sont plutôt éclatés et décousus. Pour remédier à ces lacunes, plusieurs recommandations ont été proposées.

Mots-clés : Didactique des sciences, enseignement de la modélisation, enseignement du modèle particulière, enseignement au secondaire, nature de la science.

Abstract

The teaching of science has several deficiencies : deficiencies related to content, activities and to the nature of science itself. What about the teaching of science in Quebec in relation to those deficiencies? To answer those questions, we have equated the teaching of science with the teaching of modeling. Indeed, "doing science" essentially amounts to a modeling activity. Scientists spend most of their time building, testing, revising and using scientific models. It is important to emphasize that this activity allows, on one hand, to build scientific knowledge and, on the other hand, to understand the nature of science. Thus, the objective of this thesis is to analyze the teaching of modeling in Quebec in order to determine its weaknesses. To clarify this objective, we have chosen the particular case of the particle model, because it is fundamental to the material universe.

To achieve the objectives of this research, we proceed in three stages. In the first stage, we developed criteria for the teaching of modeling and the teaching of the particle model based on several research works carried out to improve the teaching of modeling. In the second stage, we described the teaching of modeling as presented in the training program and the teaching of the particular model as presented in the formal curriculum and with certain teachers. In the third stage, this description was analyzed taking into account the grids developed in the first stage, which made it possible to identify several weaknesses in the teaching of modeling and the teaching of the particle model.

Among these shortcomings, we noted the absence of construction of the models by the pupils and the absence of the principle of differentiation between reality and the model which explains it. These two deficiencies are also present in the case of the particle model. The pupils do not have to build it. Its use is nonexistent in the training program and in the progression of learning in the first cycle. It is also ambiguous in the manuals of the first cycle and partial in the second cycle. The activities associated with it are essentially activities of memorizing and understanding concepts. These activities, which are not modeling activities, do not really make

it possible to “do science” or to understand the nature of models and the nature of science in general. Furthermore, the statements of the particle model are partial so that the particle model does not seem to be a central idea to which several concepts are linked. The latter are rather fragmented and disjointed. To remedy these shortcomings, several recommendations have been proposed.

Keywords: Science didactics, Modeling-based Teaching, Particle Model Teaching, Secondary School Teaching, Nature of Science.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1. La problématique	3
Introduction	3
1.1. La culture scientifique et technologique	3
1.2. Les résultats du Québec aux évaluations	4
1.3. Des problèmes dans l'enseignement de la science au secondaire	6
1.3.1. Des problèmes associés au contenu scientifique scolaire.....	7
1.3.2. Des problèmes associés aux activités scientifiques scolaires.....	8
1.3.3. Des problèmes associés à l'apprentissage de la nature de la science	10
1.3.4. Des problèmes de l'enseignement de la science dans le PFEQ.....	15
1.4. Des problèmes dans l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière au secondaire.....	17
1.4.1. La modélisation : une activité scientifique clé.....	18
1.4.2. Le modèle particulière : un contenu scientifique fondamental	19
1.4.3. Des problèmes associés à l'apprentissage de la nature des modèles et du modèle particulaire	20
1.5. Synthèse et questions de recherche.....	21
Chapitre 2. Le cadre conceptuel	25
Introduction	25
2.1. L'analyse de l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière.....	25
2.1.1. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans les curriculums formels.....	26
2.1.2. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le curriculum informel	28
2.1.3. L'analyse des apprentissages de la nature des modèles et du modèle particulière chez les élèves.....	30
2.2. Des concepts fondamentaux de la didactique	48
2.2.1. La modélisation et les modèles scientifiques	48
2.2.2. La progression des apprentissages de la modélisation	56
2.2.3. La modélisation en didactique des sciences.....	69
2.2.4. La visualisation : un dispositif didactique utile à la modélisation	77
2.2.5. La démarche didactique : un soutien à l'apprentissage	85
2.2.6. Une séquence de situations de modélisation mathématique.....	86
2.2.7. Une récapitulation des concepts fondamentaux	86

2.2.8. Le cas du modèle particulière.....	88
2.3. Synthèse et questions de recherche.....	94
Chapitre 3. La méthodologie	97
Introduction	97
3.1. Une étude exploratoire à caractère évaluatif.....	97
3.2. La posture de la chercheuse : du malaise à l'interrogation.....	99
3.3. Le corpus de document à analyser	100
3.4. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ.....	105
3.5. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le corpus de documents .	111
3.5.1. Le contenu du modèle particulière à analyser dans le corpus de documents	111
3.5.2. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le corpus de documents	113
3.6. Les entretiens avec quelques enseignants	118
3.6.1. Les enseignants.....	118
3.6.2. Les questions des entretiens avec les enseignants	120
3.6.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière auprès de quelques enseignants	123
3.7. Le déroulement de la recherche.....	123
3.8. Des considérations éthiques.....	124
3.9. La rigueur de la recherche	124
Chapitre 4. La présentation et l'analyse des résultats.....	129
Introduction	129
4.1. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ.....	129
4.2. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le corpus des documents	135
4.2.1. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le PFEQ.....	135
4.2.2. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans la PDA.....	141
4.2.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans les manuels scolaires	146
4.2.4. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement	164
4.2.5. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans les épreuves	175
4.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière auprès des enseignants.....	192
Chapitre 5. La discussion des résultats	205
Introduction	205

5.1. Les lacunes dans l'enseignement de la modélisation.....	205
5.2. Les lacunes dans l'enseignement du modèle particulière.....	206
5.2.1. Les lacunes du modèle particulière dans le PFEQ	206
5.2.2. Les lacunes du modèle particulière dans la PDA	208
5.2.3. Les lacunes du modèle particulière dans les manuels.....	210
5.2.4. Les lacunes du modèle particulière dans les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage et les épreuves	214
5.2.5. Les lacunes du modèle particulière d'après les pratiques des enseignants.....	215
5.3. Des recommandations pour l'enseignement de la modélisation.....	219
5.4. Des recommandations pour l'enseignement du modèle particulière.....	219
5.4.1. Des recommandations pour le programme de formation	221
5.4.2. Des recommandations pour la progression des apprentissages.....	222
5.4.3. Des recommandations pour les manuels et les guides d'enseignement	229
Conclusion.....	235
Bibliographies	245
Annexe 1 : La progression des apprentissages du modèle particulière selon Smith et coll.....	i
Annexe 2 : La progression des apprentissages du modèle particulière selon Johnson et Tymms	iv
Annexe 3 : La progression des apprentissages du modèle particulière selon Johnson.....	vi
Annexe 4 : La technique de recension des écrits	vii
Annexe 5 : Les manuels scolaires et les guides d'enseignants approuvés	viii
Annexe 6 : Le certificat d'approbation éthique	xii
Annexe 7 : Les activités d'utilisation du modèle particulière dans les guides d'enseignement et dans les activités pédagogiques des maisons d'Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. et de Chenelière Éducation	xiii

Liste des tableaux

Tableau 1: Conceptions épistémologiques associées à chacune des dimensions	11
Tableau 2 : Résumé des corrélations positives entre les conceptions épistémologiques, les conceptions d'apprentissage et les trois caractéristiques de la motivation	13
Tableau 3 : Résultats de l'activité selon Sanger (2000)	35
Tableau 4 : Comparaison entre la résolution de problèmes de type algorithmique et la résolution de problème de type conceptuel selon Nakhleh et Mitchell (1993)	41
Tableau 5 : Résumé des études sur les difficultés en lien avec les modèles et le modèle particulière	45
Tableau 6 : Premier aspect de la progression des apprentissages de la modélisation; générer et utiliser un modèle (Schwartz et al., 2009).....	65
Tableau 7 : Deuxième aspect de la progression des apprentissages de la modélisation; évaluer et réviser un modèle (Schwartz et al., 2009).....	68
Tableau 8 : Récapitulation des concepts fondamentaux.....	86
Tableau 9 : Dualité entre les réalités et les propriétés des particules	94
Tableau 10 : Parcours de formation en science et technologie	101
Tableau 11 : Grille d'analyse de la construction des modèles dans les PFEQ	107
Tableau 12 : Grille d'analyse de l'utilisation des modèles dans les PFEQ	108
Tableau 13 : Grille d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans les PFEQ	109
Tableau 14 : Grille d'analyse de la nature d'un modèle scientifique dans le PFEQ	111
Tableau 15 : Grille d'analyse de la construction de modèle particulière dans le PFEQ	115
Tableau 16 : Appréciation du deuxième critère de la grille d'analyse de la construction des modèles dans le PFEQ.....	115
Tableau 17 : Grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans le PFEQ	116
Tableau 18 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ	116
Tableau 19 : Appréciation du treizième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ.....	117

Tableau 20 : Appréciation du quatorzième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ.....	117
Tableau 21 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière dans le PFEQ.....	117
Tableau 22 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans le PFEQ	118
Tableau 23 : Caractéristiques professionnelles des participants	120
Tableau 24 : Synthèse de la méthodologie de la recherche.....	127
Tableau 25 : Grille d'analyse de la construction des modèles dans le PFEQ.....	131
Tableau 26 : Grille d'analyse de l'utilisation des modèles dans le PFEQ	132
Tableau 27 : Grille d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ..	133
Tableau 28 : Grille d'analyse de la nature d'un modèle scientifique dans le PFEQ.....	134
Tableau 29 : Concepts retenus de l'univers matériel prescrits dans le PFEQ	136
Tableau 30 : Grille d'analyse de la construction du modèle particulière dans le PFEQ	137
Tableau 31 : Appréciation du deuxième critère de la grille d'analyse de la construction du modèle particulière dans le PFEQ.....	138
Tableau 32 : Grille de l'utilisation du modèle particulière dans le PFEQ.....	138
Tableau 33 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ	139
Tableau 34 : Appréciation du treizième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ.....	140
Tableau 35 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière dans le PFEQ.....	140
Tableau 36 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans le PFEQ	141
Tableau 37 : Grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans la PDA	142
Tableau 38 : Appréciation du premier et deuxième critères de la grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans la PDA.....	143

Tableau 39 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans la PDA	144
Tableau 40 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans la PDA	144
Tableau 41 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière dans la PDA.....	145
Tableau 42 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans la PDA	146
Tableau 43 : Contenu en lien avec le modèle particulière	147
Tableau 44 : Présentation des réalités en lien avec le modèle particulière dans les manuels	158
Tableau 45 : Concepts et modèles théoriques dans les manuels.....	159
Tableau 46 : Grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans les manuels	160
Tableau 47 : Appréciation du premier et deuxième critères de la grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans les manuels	161
Tableau 48 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels	161
Tableau 49 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels.....	162
Tableau 50 : Appréciation du cinquième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels	162
Tableau 51 : Grille d'analyse de la nature du modèle particulière dans les manuels	163
Tableau 52 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans les manuels.....	163
Tableau 53 : Grille d'analyse l'utilisation du modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	171
Tableau 54 : Appréciation des deux premiers critères de la grille d'analyse l'utilisation du modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement.....	172

Tableau 55 : Grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées au modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement.....	173
Tableau 56 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées au modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	173
Tableau 57 : Appréciation du cinquième critère de la grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées au modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	173
Tableau 58 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	174
Tableau 59 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans les guides de l'enseignant et les cahiers d'activités.....	175
Tableau 60 : Épreuves théoriques de la deuxième année secondaire	176
Tableau 61 : Résumé sur la nature des questions en lien avec le modèle particulière dans les épreuves du premier cycle.....	180
Tableau 62 : Épreuves théoriques de la troisième année secondaire.....	181
Tableau 63 : Résumé sur la nature des questions en lien avec le modèle particulière dans les épreuves de la troisième année du secondaire.....	185
Tableau 64 : Épreuves uniques de la 4e année secondaire entre 2012 et 2015.....	186
Tableau 65 : Épreuves uniques de la 4 ^e année secondaire entre 2016 et 2019	187
Tableau 66 : Nombre de questions retirées par année scolaire.....	187
Tableau 67 : Grille d'analyse l'utilisation du modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	190
Tableau 68 : Appréciation des trois premiers critères de la grille d'analyse l'utilisation du modèle particulière dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement.....	190
Tableau 69 : Grille d'analyse de l'évaluation des connaissances associées au modèle particulière dans les épreuves	191
Tableau 70 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse de l'évaluation des connaissances associées au modèle particulière dans les épreuves.....	191

Tableau 71 : Appréciation du cinquième critère de la grille d'analyse de l'évaluation des connaissances associées au modèle particulière dans les épreuves.....	191
Tableau 72 : Grille d'analyse de l'évaluation de la nature du modèle particulière dans les épreuves.....	192
Tableau 73 : Matériel didactique des participants et des élèves	193
Tableau 74 : Grille d'analyse de l'enseignement de la construction et de l'utilisation du modèle particulière auprès des participants	200
Tableau 75 : Appréciation en fonction du nombre de réalités associées au modèle particulière	201
Tableau 76 : Appréciation en fonction du nombre d'énoncés du modèle particulière enseignés	201
Tableau 77 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière auprès des enseignants	202
Tableau 78 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière auprès des participants.....	202
Tableau 79 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière auprès des participants	203
Tableau 80 : Résumé des lacunes de l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière dans le curriculum formel	217
Tableau 81 : Résumé des lacunes de l'enseignement du modèle particulière par les enseignants	218
Tableau 82 : Synthèse sur l'enseignement du modèle particulière	220
Tableau 83 : Construction et utilisation du modèle particulière dans la PDA proposée	223

Liste des figures

Figure 1 : De la science au modèle particulaire	21
Figure 2 : Enseignement du modèle particulaire pour simuler l'enseignement de la science....	23
Figure 3 : Dessins des particules à classer	34
Figure 4 : Représentations de la réaction de décomposition de N_2O_4	43
Figure 5 : Processus de construction des modèles (Giere, 1991)	50
Figure 6 : Représentation de la relation d'idéalisation et d'approximation	53
Figure 7 : Relations syntaxiques, empiriques et sémantiques (Robardet et Guillaud, 1997 p. 112)	55
Figure 8 : Processus itératif de construction de modèle (Clement, 1989)	70
Figure 9 : Analogie entre les particules à l'état solide et une unité militaire	72
Figure 10 : Représentation de l'enseignement de la modélisation	105
Figure 11 : Représentation de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ	205
Figure 12 : Représentation de l'enseignement du modèle particulaire dans le PFEQ	206
Figure 13 : Représentation de la fonction explicative du modèle particulaire dans la PDA ...	208
Figure 14 : Représentation de la fonction représentative du modèle particulaire dans la PDA	209
Figure 15 : Représentation de l'utilisation du modèle particulaire dans les manuels.....	212
Figure 16 : Relation entre le problème et les connaissances (Orange, Problème et modélisation en biologie, 1997, p. 11)	219
Figure 17 : Représentation de l'enseignement recommandé du modèle particulaire.....	221
Figure 18 : Représentation du contenu d'enseignement, au 1 ^{er} cycle, autour du modèle particulaire	226
Figure 19 : Représentation du contenu d'enseignement, en troisième année secondaire, autour du modèle particulaire.....	227
Figure 20 : Représentation du contenu d'enseignement, en quatrième année secondaire, autour du modèle particulaire.....	228
Figure 21 : Carte conceptuelle représentant les caractéristiques des trois états de la matière.	232

*En souvenir affectueux de mes parents qui ont réussi à me transmettre l'amour de la science
En souvenir affectueux de mes deux frères Abdelmadjid et Ahmed
En souvenir affectueux de mon neveu Ali*

Remerciements

Je suis très heureuse et honorée d'avoir été dirigée par le professeur Marcel Thouin. Je tiens à lui adresser mes plus vifs remerciements pour m'avoir fait découvrir ce passionnant domaine qu'est la didactique des sciences. Je veux aussi lui exprimer toute ma gratitude pour le temps passé à travailler avec moi, pour sa disponibilité sans limite, pour ses précieux conseils et pour ses discussions enrichissantes. J'ai énormément appris à son contact.

Ma profonde gratitude s'adresse également au professeur Pierre Nonnon pour avoir accepté de présider le jury ainsi qu'aux professeurs Diane Gauthier et Ghislain Samson qui me font l'honneur de juger cette thèse.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont bien voulu donner généreusement de leur temps pour participer à cette étude.

Je remercie Mme Nicole Gaboury pour sa disponibilité et son professionnalisme.

Je remercie affectueusement toute ma famille en particulier mes sœurs Aicha, Hatimia, Nadjat, Meriem et Assya pour leurs encouragements continus.

Un merci tout spécial à François pour son soutien indéfectible et la patience dont il a fait preuve durant la réalisation de cette thèse.

Introduction

La culture scientifique présente des lacunes au Québec. De plus, les élèves sont de moins en moins attirés par des carrières scientifiques et leurs résultats au programme pancanadien d'évaluation (PPCE) et au programme international pour le suivi des acquis (PISA) sont à la baisse depuis 2010 et 2009 respectivement.

L'enseignement de la science présente, généralement, plusieurs lacunes. Celles-ci peuvent être associées au contenu scientifique scolaire, aux activités ou à l'enseignement de la nature de la science. Ainsi, il est intéressant d'examiner l'enseignement de la science au Québec en lien avec ces lacunes.

Pour ce faire, nous avons choisi d'assimiler l'enseignement de la science à l'enseignement de modélisation. En effet, la modélisation est une activité clé qui permet de « faire la science ». Pour préciser l'analyse de l'enseignement de la modélisation, nous avons choisi comme modèle, le modèle particulaire. Il représente un contenu scientifique fondamental de l'univers matériel. Il est important de souligner que l'enseignement de la modélisation est très important. Comme nous l'avons mentionné, il permet aux élèves de « faire la science » et, par suite, il leur permet de comprendre la nature de la science, ce qui peut être une source de motivation pour eux.

Ainsi, analyser l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulaire en vue de cerner leurs lacunes sont les objectifs de la présente thèse. Dans le premier chapitre, plusieurs points sont discutés : les lacunes dans la culture scientifique et technologique au Québec, les résultats décroissants aux évaluations des élèves québécois, les carrières scientifiques de plus en plus délaissées, les difficultés dans l'enseignement de la science, l'enseignement de la modélisation, la compréhension du modèle scientifique et l'apprentissage du modèle particulaire. Tous ces points justifient les objectifs de cette

recherche. Afin de préciser ces objectifs, il est question du curriculum formel et du curriculum informel au deuxième chapitre. Par ailleurs, des concepts fondamentaux de la didactique, qui servent d'assise à l'enseignement de la modélisation et à l'enseignement du modèle particulière, sont également rapportés. Le troisième chapitre précise le cadre méthodologique de cette recherche. Il inclut le type de la recherche, la posture de la chercheuse, le corpus de documents à analyser, la description des participants à la recherche (enseignants), les techniques de collectes de données, les grilles d'analyse élaborées par la chercheuse et les méthodes d'analyse des données collectées. Les résultats sont présentés au quatrième chapitre, lequel est suivi d'une discussion et des recommandations sur l'enseignement de la modélisation en général et l'enseignement du modèle particulière en particulier.

Chapitre 1. La problématique

Introduction

Nous abordons ce chapitre par la notion de culture scientifique et technologique et par les résultats des élèves québécois aux évaluations. Nous présentons, ensuite, des problèmes dans l'enseignement de la science au secondaire. Ces problèmes sont relatifs au contenu disciplinaire, aux activités scientifiques et aux conceptions épistémologiques chez les élèves. Les enjeux des conceptions épistémologiques des élèves sont exposés. Le point suivant porte sur les problèmes associés à l'enseignement de la science dans le programme de formation de l'école québécoise (PFEQ). L'enseignement de la science étant un objectif vaste et irréaliste à étudier dans le cadre d'une seule recherche, nous nous concentrons sur l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière. Ces choix ne sont pas arbitraires, comme on pourra le constater à la lecture de ce chapitre. Des problèmes d'apprentissage du modèle scientifique en général et du modèle particulière en particulier sont ensuite présentés. Ce chapitre se termine par une synthèse, suivie de deux questions de recherche.

1.1. La culture scientifique et technologique

La culture scientifique et technologique est primordiale en particulier dans une société démocratique et de savoir comme le Québec. Elle permet d'appréhender le développement de la science et de la technologie qui sont omniprésentes dans la vie de tous les jours. Elle facilite l'adaptation à un environnement en transformations perpétuelles qui le rendent de plus en plus complexe. Elle permet également de saisir les effets et les risques du développement de la science et de la technologie, ce qui permet d'exercer un esprit critique face à ce développement et de prendre des décisions éclairées.

Compte tenu de cette importance, dès 1965, la promotion de la culture scientifique et technique apparaît au Québec. Cette culture était définie « [...] comme l'ensemble minimal de connaissances relatives aux sciences et à la technologie que doivent détenir tout honnête

homme et toute honnête femme » (Conseil de la science et de la technologie, 2002, p. 6). En 2002, une nouvelle définition a été formulée par le Conseil de la science et de la technologie : « la culture scientifique et technique correspond à un ensemble de connaissances et de compétences en sciences et en technologie que les citoyens et la société font leurs et utilisent » (Conseil de la science et de la technologie, 2002, p. 15). Il est intéressant de souligner que cette dernière définition apporte deux ajouts par rapport à la première. Le premier concerne la notion de compétences et le deuxième réside dans la dimension sociale de la culture scientifique et technique.

Le bilan dressé par le Conseil de la science et de la technologie (2002) montre des lacunes dans la culture scientifique et technologique de la population en général. Par exemple, les Québécois obtiennent un résultat de 62 % à un test portant sur des connaissances de base en science et en technologie. De plus, la culture scientifique et technique n'est pas uniformément répartie dans la population. Les personnes ayant un niveau socio-économique faible sont moins concernées par cette culture.

Face à ces constats, des recommandations ont été émises. Parmi ces dernières, le renforcement de l'enseignement de la science et de la technologie à l'école puisque : « c'est à l'école qu'il revient en premier lieu de former adéquatement des générations futures » (Conseil de la science et de la technologie, 2002, p. 175). Quels sont les résultats des élèves québécois en science depuis ces recommandations ?

1.2. Les résultats du Québec aux évaluations

Les résultats des élèves québécois sont examinés à partir du programme pancanadien d'évaluation (PPCE) et du programme international pour le suivi des acquis des élèves (Programme for International Student Assessment, PISA).

Le PPCE évalue, chaque trois ans, les connaissances et les compétences des élèves de deuxième secondaire (huitième année) du Canada en lecture, en mathématiques et en sciences. Cette évaluation permet de comparer les rendements des élèves canadiens dans toutes les provinces afin de déterminer si, pour un même niveau, les élèves canadiens ont des rendements semblables (Conseil des ministres de l'Éducation, 2008). À chaque cycle d'évaluation, il y a un domaine principal et deux autres secondaires. Le PPCE a été administré pour la première fois en 2007 avec la lecture comme domaine principal. En 2010, les mathématiques représentaient le domaine principal et en 2013, c'était au tour des sciences d'être le domaine principal (Conseil supérieur de l'éducation, 2013). Les résultats des élèves québécois de 2^e secondaire montrent une baisse en sciences. Cette baisse est marquée en 2010 et 2013. En effet, en 2007, le Québec était classé en 2^e position avec un résultat significativement supérieur (511) à la moyenne canadienne (500). En 2010, le Québec s'est retrouvé à la 9^e position avec un résultat significativement inférieur (486) à la moyenne canadienne (500) (Conseil supérieur de l'éducation, 2013). Cette baisse est également observée en 2013 où le Québec occupe la 8^e position avec un résultat significativement inférieur (485) à la moyenne canadienne (Office de la qualité et de la responsabilité en éducation, 2014). En 2016 (où le domaine principal d'évaluation est la lecture), le Québec était en 4^e position en sciences (Conseil des ministres de l'Éducation, 2018). Certes, cette position est meilleure que celle de 2010 (9^e position) et de 2013 (8^e position), cependant, le résultat québécois (507) n'est plus significativement supérieur à la moyenne canadienne (508) tel que cela était en 2007.

Le PISA s'adresse à des élèves âgés de 15 ans. Il est administré chaque trois ans à partir de l'année 2000. Tout comme le PPCE, ce programme évalue les élèves en lecture, en mathématiques et en sciences. Chaque cycle comporte un domaine principal et deux autres secondaires. Les sciences représentaient le domaine principal en 2006. Les résultats de PISA montrent que la moyenne de toutes les provinces du Canada est supérieure à celle de l'ensemble des pays de l'OCDE (Conseil des ministres de l'Éducation, 2013). Cependant, il existe des différences entre les provinces. Entre 2006 et 2012, la moyenne en sciences du Québec

est inférieure à celle du Canada et, en baisse (531 en 2006; 524 en 2009 et 516 en 2012) (Conseil des ministres de l'Éducation, 2013). Cette moyenne a augmenté en 2015 (537), mais a malheureusement baissé en 2018 (522) (Conseil des ministres de l'Éducation, 2019).

En plus de ces résultats, certaines études montrent une désaffection des élèves québécois envers la science et la technologie et des taux d'échec élevés à l'épreuve commune en science et technologie de 4^e secondaire (Conseil de la science et de la technologie, 2002; Conseil des ministres de l'Éducation, 2008; Dion-Viens, 2012, 10 septembre; Santerre, 2006).

Ces résultats qui sont pour le moins préoccupants nous amènent à nous questionner sur l'enseignement de la science et de la technologie au Québec aujourd'hui, c'est-à-dire après la réforme de 2002.

1.3. Des problèmes dans l'enseignement de la science au secondaire

Au Québec, la réforme a conduit à des changements importants de l'enseignement au primaire et au secondaire. Au secondaire, alors qu'il y avait des champs disciplinaires différents pour représenter les sciences de la nature (biologie générale, biologie humaine, chimie, écologie, physique), l'actuel PFEQ a intégré ces disciplines (Hasni, Lenoir, & Lebeaume, 2006) en leur incluant la technologie pour constituer le programme disciplinaire « science et technologie » (Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport, 2006, 2007). Une autre forme d'intégration a permis de regrouper le domaine disciplinaire de science et technologie à celui de la mathématique puisque cette dernière est souvent utilisée en science et technologie (Samson, 2007). En plus de l'intégration des disciplines, le PFEQ vise à développer des compétences disciplinaires et transversales. Aussi, cinq domaines généraux de formation (DGF) sont introduits dans le PFEQ pour établir des liens entre les apprentissages et des problématiques de la vie de tous les jours. Le PFEQ cible également le développement, chez les élèves, d'une culture scientifique par l'articulation des compétences disciplinaires et des domaines de

formation, d'une part, avec les compétences transversales et les domaines généraux de formation, d'autre part (Hasni, Lenoir, & Lebeaume, 2006).

Toutes ces nouvelles composantes (intégration des disciplines, compétences disciplinaires, compétences transversales, domaines généraux de formation) impliquent plusieurs défis dans l'enseignement de la science au secondaire. Par exemple, Hasni et Lebeaume (2010) se questionnent, entre autres, sur la façon d'intégrer des contenus de différentes disciplines scientifiques dans un même enseignement ainsi que sur la prise en charge, par les enseignants, des disciplines pour lesquelles ils ne sont pas formés.

Outre ces défis, signalons que l'enseignement de la science (en tant que discipline) présente des problèmes en lien avec son contenu scolaire, ses activités scolaires et la nature de la science. C'est à ces problèmes que nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse. Précisons qu'ils sont associés aux trois objectifs majeurs de l'enseignement de la science selon Hodson (1992, 2014), lesquels sont : 1- acquérir et développer le contenu scientifique scolaire, 2- « faire de la science », 3- connaître la nature de la science et son impact au niveau social.

1.3.1. Des problèmes associés au contenu scientifique scolaire

Au Québec et dans bien d'autres pays, le contenu disciplinaire de la science au secondaire est prescrit dans le programme de formation. Les manuels scolaires constituent un support essentiel à ce contenu. Ils en sont le reflet (Astolfi, 1992). D'ailleurs, au Québec, compte tenu de leur importance, les manuels scolaires sont approuvés par le Ministère de l'Éducation avant d'être utilisés par les élèves. Certains auteurs ont examiné le contenu scientifique à partir des manuels scolaires (Astolfi, 1992; Chiappetta, 1993; Niclot, 2012).

Plusieurs problèmes associés au contenu disciplinaire sont relevés. Potvin (2018) dénonce une fragmentation « qui va si loin au-delà de l'utile ». Cette fragmentation génère une multiplication des étiquettes pour l'apprenant (chaque fragment lui correspond une étiquette). Astolfi (1992) soutient également que le contenu est essentiellement une

accumulation de notions qui s'ajoutent les unes aux autres. La plupart du temps, ces ajouts se font en pointillés, c'est-à-dire que leur articulation n'est pas toujours visible à l'élève. Astolfi (1992, p. 49) qualifie le savoir scolaire de « *savoir en miettes* ». Ce savoir peut être très dense en informations : 40 à 50 informations dans une double page. Les informations sont diverses aussi bien en nature (des notions-clés, des définitions, des exemples, etc.) qu'en degré d'importance (des notions-clés, des notions moins importantes). Le problème ou la question qui sont à l'origine d'un savoir donné ont disparu. Cette dernière lacune a pour conséquence de dépouiller le savoir scientifique du processus qui lui a donné naissance. Elle lui enlève son aspect réfléchi et raisonné. Ce faisant, elle le réduit à un produit final de sorte qu'il apparait aux élèves comme une vérité indiscutable.

Comment peut-on espérer qu'avec de tels problèmes l'élève puisse s'initier au raisonnement scientifique ? Comment pourrait-il développer ses capacités de penser, ses opérations intellectuelles, ses habiletés cognitives ? Comment, une fois adulte, ces élèves pourraient-ils prendre des décisions éclairées le cas échéant ? Qu'est-ce qui ferait en sorte que certains élèves choisiraient des carrières scientifiques ? Qu'en est-il des activités scientifiques ? Comblent-elles cette lacune ?

1.3.2. Des problèmes associés aux activités scientifiques scolaires

En se basant sur la recherche et sur ses observations en classe, Hodson (2006) présente une série de problèmes relatifs aux activités scientifiques scolaires. Il rapporte que les enseignants proposent souvent aux élèves des activités qui dépassent leurs habiletés pratiques sous prétexte de les développer. L'auteur soutient qu'on devrait d'abord enseigner ces habiletés, ensuite faire en sorte de les développer au moyen de travaux pratiques (Hodson, 1992, 1993).

Le choix des activités n'est pas vraiment cohérent avec l'objectif d'apprentissage. Les enseignants recourent souvent à un matériel où une seule méthode est utilisée (Hodson, 2006). Ainsi, l'idée d'une unique méthode scientifique bien linéaire dite OHERIC (1- observation, 2- hypothèse, 3- expérience, 4- résultat, 5- interprétation, 6- conclusion) est

bien véhiculée. Ce qui génère une image irréaliste des activités scientifiques authentiques. Du point de vue épistémologique, il est bien connu qu'il n'existe pas de méthode scientifique unique, encore moins linéaire. L'OHÉRIC est plutôt un artifice de présentation des publications scientifiques (Astolfi et al., 1978; Potvin, 2018).

Le lien entre l'activité scientifique et l'apprentissage conceptuel n'est souvent pas présenté à l'élève, ce qui ne permet pas vraiment d'atteindre le premier objectif de l'enseignement de la science, dont il a été question précédemment, et qui revient à acquérir et à développer le contenu scientifique scolaire (Hodson, 2006).

Les activités scolaires sont généralement très simplifiées; elles impliquent des processus cognitifs inefficaces qui ne permettent pas à l'élève relever des défis cognitifs, ce qui peut être démotivant (Hodson, 2006). En effet, Pizzini (1991) a montré que la majorité des activités scolaires sont de deux types. Dans le premier type, le résultat et le protocole sont donnés à l'élève. Ce dernier doit simplement vérifier le résultat. Dans le deuxième type d'activités, le résultat n'est pas fourni, mais le protocole est donné à l'élève qui doit le suivre pas à pas et trouver le résultat. Ces activités impliquent des processus simples qui sont qualitativement différents de ceux qui sont utilisés dans des activités scientifiques authentiques (Chinn et Malhotra, 2002).

Certes, les activités scolaires doivent être plus simples que les activités scientifiques authentiques. Mais, jusqu'à quel point peut-on simplifier ? Les activités scolaires présentées aux élèves nous rappellent un peu la parabole de l'ivrogne cherchant sa clef¹. Cette parabole traduit bien qu'un moyen (l'éclairage sous le réverbère dans le cas de la parabole et la

¹ Il est minuit passé et l'avenue est très sombre, jalonnée seulement par les quelques tâches claires que projettent de rares réverbères. Au pied de l'un d'eux, un ivrogne hoquetant accroupi, cherche en tâtonnant la clef de sa maison, distante de quelques quinze mètres.

Un passant compatissant propose de l'aider et l'interroge : « Vous souvenez-vous où vous avez perdu cette clef ? » « Oui, répond l'ivrogne, devant la porte de ma maison alors que je cherchais à l'ouvrir ». « Mais pourquoi alors ne cherchez-vous pas devant cette porte ? » s'étonne le passant. « Parce qu'ici au moins, sous le réverbère, il fait clair et je peux voir ».

simplification dans le cas des activités scolaires), bien qu'il puisse aider ne permet pas nécessairement de résoudre des problèmes. En effet, l'éclairage n'a pas permis à l'ivrogne de trouver sa clef, tout comme des simplifications abusives ne permettent pas à l'élève de résoudre des problèmes scientifiques et de « faire la science ».

1.3.3. Des problèmes associés à l'apprentissage de la nature de la science

Plusieurs travaux ont montré que certains élèves ne comprennent pas vraiment la nature de la science. Ces travaux ont identifié plusieurs conceptions épistémologiques fréquentes chez les élèves. Ces conceptions sont importantes à considérer pour plusieurs raisons : 1- elles peuvent être des indicateurs de difficultés associées au contenu scientifique ou aux méthodes scientifiques scolaires; 2- elles ont un impact sur les conceptions de l'apprentissage de la science; 3- elles sont en relation avec la motivation à l'apprentissage de la science chez les élèves. Ainsi, pour mieux comprendre les enjeux des conceptions épistémologiques, nous commençons cette section en les définissant. Nous définissons, ensuite, ce qu'on entend par les conceptions de l'apprentissage. Après, nous présentons, d'une part, les relations entre les conceptions épistémologiques et les conceptions de l'apprentissage; et d'autre part, les relations entre les conceptions épistémologiques, les conceptions de l'apprentissage et les types de motivation. Nous terminons cette section par un exposé de quelques exemples de conceptions épistémologiques fréquentes chez les élèves.

1.3.3.1. Les enjeux des conceptions épistémologiques des élèves

Les conceptions épistémologiques

L'épistémologie est une branche de la philosophie qui concerne l'étude de la connaissance et les processus de sa formation. Les psychologues se sont appropriés cette notion. Ils ont défini les conceptions épistémologiques comme un ensemble de croyances des individus relatives au savoir scientifique et à la manière dont il est produit (Sandoval, 2005). Nous présenterons plus loin quelques exemples de conceptions épistémologiques fréquentes chez les élèves. Hofer et Pintrish (1997) ont défini quatre dimensions auxquelles peuvent être associées les conceptions épistémologiques. Ces quatre dimensions sont : 1- le degré d'incertitude du savoir, 2- la

structure du savoir, 3- la source du savoir et 4- l'évaluation du savoir. Pour chaque dimension, des conceptions de niveau inférieur et d'autres plus évoluées ont été identifiées (Hofer et Pintrish, 1997). Le tableau 1 résume les conceptions épistémologiques de niveau inférieur et de niveau plus évolué associées à chacune des dimensions.

Tableau 1: Conceptions épistémologiques associées à chacune des dimensions

	Niveau inférieur	Niveau plus évolué
Le degré d'incertitude du savoir	Le savoir est une vérité absolue qui existe avec certitude.	Le savoir est provisoire et évolutif.
La structure du savoir	C'est une accumulation discrète du contenu scientifique.	C'est un continuum interdépendant.
La source du savoir	Le savoir est transmis par une autorité extérieure (scientifiques, manuels, etc.)	Le savoir est construit et on se voit soi-même comme constructeur de savoir.
L'évaluation du savoir	Elle est dualiste (le savoir est accepté ou non accepté)	Elle est nuancée avec des opinions multiples.

Les conceptions de l'apprentissage chez les élèves

D'après Liang et Tsai (2010), les conceptions de l'apprentissage des élèves ont d'abord été étudiés par Saljo (1979). Plusieurs études ont continué à investiguer ces conceptions. Duarte (2007) a proposé six conceptions de l'apprentissage : 1- une augmentation de la connaissance; 2- une mémorisation et une reproduction des connaissances; 3- une mémorisation et une application des connaissances; 4- une compréhension des connaissances; 5- une interprétation des connaissances et 6- un changement personnel.

Dans le domaine de la science, sept niveaux de conception ont été identifiés qui, du moins évolué au plus évolué, sont : 1- une mémorisation de définitions, de formules, de lois et de vocabulaire; 2- une préparation à des tests et à des examens pour obtenir de bons résultats; 3- une série de calculs, des exercices et des manipulations de formules et de nombres; 4- une augmentation de la connaissance; 5- une application de la science à des situations de tous les jours ou pour inventer des objets qui améliorent la qualité de la vie; 6- une compréhension de

la science et une acquisitions des habiletés à construire des connaissances cohérentes; et 7- une nouvelle façon d'interpréter les phénomènes naturels et de voir la nature (Tsai, 2004). Les trois premiers niveaux font partie du profil de reproduction des connaissances alors que les quatre derniers représentent le profil de la construction des connaissances (Lin, Tsai, et Liang, 2012).

Dans le premier profil, l'apprentissage est perçu comme une reproduction des connaissances au moyen de la mémorisation, des préparations à des tests, des calculs et des exercices. L'élève perçoit les connaissances comme toutes faites et extérieures à lui. Dans le deuxième profil, l'apprentissage est perçu comme une construction des connaissances (approche constructiviste de l'apprentissage); les connaissances ne sont pas extérieures à l'apprenant, elles sont construites et mises en application par lui-même.

Les relations entre les conceptions épistémologiques et les conceptions de l'apprentissage

Les conceptions épistémologiques des élèves sont en lien avec leurs conceptions de l'apprentissage (Hofer et Pintrish, 1997; Muis, 2007). Par exemple, les élèves qui pensent que la science relate la réalité de manière objective ont des difficultés à adopter une approche constructiviste de l'apprentissage (Carey et Smith, 1993). Par ailleurs, Liang et Tsai (2010) ont constaté que les élèves, qui ont des conceptions épistémologiques de niveau inférieur concernant la dimension de la source du savoir et celle en lien avec le degré d'incertitude du savoir (tableau 1), ont tendance à concevoir l'apprentissage comme une mémorisation, des préparations à des tests, des calculs et des exercices. En d'autres termes, ils ont tendance à avoir des conceptions de l'apprentissage de niveau inférieur (tel que défini au paragraphe précédent).

Il y a donc une cohérence entre le niveau des conceptions épistémologiques et celui des conceptions de l'apprentissage. Ainsi, les élèves qui ont des conceptions épistémologiques évoluées voient l'apprentissage, d'une part, comme une application et une construction des connaissances et, d'autre part, comme une nouvelle vision du monde. À l'inverse, les élèves

qui ont des conceptions épistémologiques de niveau inférieur voient, d'une part, l'apprentissage comme un simple cumul de connaissances et, d'autre part, conservent la même vision du monde.

Les relations entre les conceptions épistémologiques, les conceptions de l'apprentissage et les types de motivation

Plus récemment, des études ont montré une relation entre les conceptions d'apprentissage et la motivation (Ho et Liang, 2015; Karakolidis, Pitsia et Emvalotis, 2019). Ho et Liang (2015) ont montré qu'une conception de l'apprentissage orientée sur la reproduction de l'apprentissage est négativement corrélée à une motivation profonde alors qu'une conception de l'apprentissage constructiviste est positivement corrélée à une motivation profonde. Une synthèse de toutes ces relations est présentée dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Résumé des corrélations positives entre les conceptions épistémologiques, les conceptions d'apprentissage et les trois caractéristiques de la motivation

Conceptions épistémologiques	Conceptions de l'apprentissage	Caractéristiques de la motivation
De niveau inférieur	Approche de reproduction des connaissances	Superficielle ²
Évoluées	Approche constructiviste	Profonde

1.3.3.2. Des exemples de conceptions épistémologiques chez les élèves

Les études des conceptions épistémologiques des élèves remontent à plus d'un demi-siècle. Lederman (2007) souligne que ces études ont commencé avec le travail de Wilson (1954). Le but de cette sous-section n'est pas de faire une revue de ces conceptions (au besoin, le lecteur pourrait se référer au travail de Driver, Leach, Millar et Scott (1996)), mais plutôt de présenter quelques exemples relatifs 1- au caractère construit du savoir, 2- aux méthodes scientifiques,

² L'étude de Ho et Liang (2015) a montré une corrélation négative entre des conceptions de niveau inférieur et la motivation profonde. Nous avons alors supposé que la corrélation est positive entre les conceptions de niveau inférieur et une motivation superficielle.

3- aux formes du savoir (concepts, lois, modèles et théories) et 4- à la nature provisoire du savoir (Sandoval, 2005).

Le caractère construit du savoir

Plusieurs élèves du secondaire ont de la difficulté à concevoir le caractère construit du savoir scientifique. Plusieurs élèves pensent que le savoir scientifique a été découvert et que beaucoup de découvertes se font par hasard ou par accident (Ryan et Aikenhead, 1992). Parmi les élèves qui ont développé l'idée du caractère construit de la science, plusieurs ont tendance à déclarer que les connaissances scientifiques découlent directement des résultats expérimentaux, (Carey et Smith, 1993; Driver, Leach, Millar et Scott, 1996; Ryan et Aikenhead, 1992).

Les méthodes scientifiques

Pour les élèves, le savoir scientifique est découvert par l'expérimentation et par une méthode scientifique. Cependant, ils ont une conception vague de cette prétendue méthode (Ryan et Aikenhead, 1992). Lorsqu'ils sont amenés à choisir une description d'une démarche à caractère scientifique, ils optent pour la séquence : questionner, émettre une hypothèse, collecter des données et conclure. Par ailleurs, les élèves ont de la difficulté à définir ce que représente une expérimentation et à parler de ce qui se rapporte à des tests ou à la construction des idées (Sandoval et Morrison, 2003). En se référant à des recherches, ces derniers auteurs rapportent que beaucoup d'élèves ne distinguent pas les résultats expérimentaux des idées à tester. Pour ces élèves, l'expérimentation va directement prouver si l'hypothèse est vraie ou fausse (Carey, Evans, Honda, Jay, et Unger, 1989). Souvent, ils ne voient pas que les expérimentations sont destinées à tester les relations causales (Reif et Larkin, 1991; Schauble, Glaser, Duschl, Schulze, et John, 1995).

Les formes du savoir

La même recherche (Ryan et Aikenhead, 1992) a révélé que la plupart des élèves ne saisissent pas vraiment la différence entre les concepts d'hypothèse, de loi, de théorie et de modèle. Ils

les considèrent comme une progression linéaire du moins prouvé au plus prouvé. Ainsi, les hypothèses deviennent les théories et les théories deviennent des lois. D'où l'appellation de « laws-are-mature-theories fable » (Rubba et Andersen 1978 cité par Lederman 1992). Les élèves semblent ignorer que de nombreuses lois de la science étaient connues avant que les théories n'aient été développées pour les expliquer. La loi de Boyle-Mariotte ou la loi de la réfraction en sont des exemples.

Le savoir scientifique est provisoire

La plupart des élèves parlent des idées comme étant vraies ou fausses. Ainsi, la plupart des élèves semblent croire que les vieilles idées sont tout simplement fausses et remplacées par des idées nouvelles et vraies. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'instruction tend à détacher les idées de leur développement historique et à se concentrer sur ce que Duschl (1990) appelle la « final form science » (Sandoval, 2005).

La représentation de la nature de la science

En analysant 98 documents standard de 48 états américains et divers matériels de plusieurs maisons d'édition dans 34 états américains, Summers et Al. (2019) ont montré que la représentation de la nature de la science s'est très peu améliorée en plus 30 ans (de 1980 à 2016). Ces auteurs trouvent ce constat inquiétant, car le matériel didactique utilisé en classe ainsi que l'enseignement peuvent être affectés puisqu'ils se basent essentiellement sur les documents standard.

1.3.4. Des problèmes de l'enseignement de la science dans le PFEQ

Le petit détour par la recherche a montré que l'enseignement de la science pouvait présenter plusieurs lacunes qui peuvent être associées au contenu, aux activités et à la nature de la science. Qu'en est-il du programme de formation de l'école québécoise ?

Au secondaire (aussi bien au premier cycle qu'au deuxième cycle), le PFEQ cible le développement de trois compétences : 1- Chercher des réponses ou des solutions à des

problèmes d'ordre scientifique ou technologique; 2- Mettre à profit ses connaissances scientifiques et technologiques; 3- Communiquer à l'aide des langages utilisés en science et en technologie (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2006). Le développement de ces compétences s'effectue dans le contexte de situations d'apprentissage. Ces situations permettent d'établir plusieurs liens : 1- un lien entre les concepts scientifiques et les réalités de la vie des élèves (situations contextualisées); 2- un lien entre les quatre univers scientifiques, c'est-à-dire l'univers matériel, l'univers vivant, la Terre et l'espace et l'univers technologique (situations intégratives); 3- un lien entre l'intention pédagogique et les domaines généraux de formation.

Comment les élèves s'approprient-ils le contenu scientifique prescrit ?

Bien que la pertinence de ces approches (approche par compétences, intégration des différents domaines de la science, lien entre les concepts scientifiques et la vie quotidienne des élèves, lien avec les domaines généraux de formation, etc.) soit incontestable, elles ne semblent pas répondre à des questions fondamentales de l'enseignement et de l'apprentissage de la science. Par exemple, concernant les concepts scientifiques, le PFEQ mentionne que l'exercice de la compétence 2 « suppose que l'élève se soit approprié les concepts fondamentaux... » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2006, p. 16). Il est également question que l'élève utilise de manière pertinente des concepts, des lois, des modèles et des théories de la science et de la technologie (Ministère de l'Éducation du Québec, 2009). Mais, comment les élèves s'approprient-ils le contenu scientifique prescrit ? La réponse à cette question ne semble pas explicite dans le PFEQ. Ainsi, une exploration des éléments de réponse est nécessaire.

Quels problèmes pour quels contenus ?

« Les trois compétences se développent et s'évaluent en interaction et non de manière isolée et séquentielle. » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2006, p. 3). Certes, l'interaction entre la compétence 2 et la compétence 3 est facile à comprendre puisque la mise à profit des connaissances scientifiques et technologiques (compétence 2) implique

nécessairement de communiquer à l'aide des langages utilisés en science et en technologie (compétence 3). Cependant, si la relation entre la compétence 2 et la compétence 3 est facile à comprendre, le lien est entre la compétence 1 et les deux autres compétences est moins évident à saisir. Qu'est ce qui relie les connaissances scientifiques et technologiques, dont il est question à la compétence 2, à la recherche des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique (compétence 1) ? Est-ce que l'élève utilise des connaissances qui lui ont été transmises au préalable pour résoudre des problèmes scientifiques ou est-il amené à construire lui-même des connaissances à partir de résolutions de problèmes scientifiques ? S'il s'agit du deuxième cas, autrement dit l'élève est amené à construire des connaissances à partir de résolutions de problèmes scientifiques, quelles connaissances l'élève est-il amené à construire et à partir de quels problèmes scientifiques (Orange, 1997) ?

Le PFEQ favorise-t-il la compréhension de la nature de la science ?

Qu'en est-il de la nature de la science ? L'enseignement tient-il compte du caractère construit de la science et de sa nature ?

Si la compétence 2 permet de comprendre le contenu scientifique et la compétence 1 (lorsqu'elle est développée chez l'élève) permet de « faire la science », comment l'élève peut-il comprendre la nature de la science ? Les trois compétences sont-elles suffisantes pour permettre à l'élève de déduire tout seul la nature de la science ? Sont-elles suffisantes pour permettre à l'élève d'acquérir des conceptions épistémologiques acceptables ?

1.4. Des problèmes dans l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière au secondaire

La culture scientifique des élèves peut être développée à partir de l'apprentissage de la modélisation et des modèles (Hodson, 2014; Oh et Oh, 2011). C'est pourquoi, pour préciser notre réflexion sur l'enseignement de la science, nous avons décidé de la canaliser sur

l'enseignement de la modélisation, en particulier celle qui concerne le modèle particulière. En effet, mieux l'objet de réflexion est cerné, plus son analyse est affinée. Mais, qu'est-ce qui justifie ces choix ? Pourquoi l'enseignement de la modélisation et pourquoi le modèle particulière ?

La modélisation et le modèle particulière sont choisis compte tenu de leur pertinence scientifique. Ainsi, la modélisation représente un processus clé en science. Elle permet de comprendre la nature des modèles puisqu'ils en découlent et, par suite, elle contribue à la compréhension de la nature de la science et au développement d'une culture scientifique tel que mentionné précédemment. Quant au modèle particulière, il permet, d'une part, de rendre plus explicite une analyse sur la modélisation et, d'autre part, il est lui-même un concept fondamental en science.

1.4.1. La modélisation : une activité scientifique clé

Il est bien connu que les modèles jouent un rôle indispensable en science. Ils permettent, d'une part, de représenter, d'expliquer et de prédire des réalités et, d'autre part, ils structurent les théories.

Halloun (2007) établit une analogie fort intéressante. Il considère que le modèle est pour la théorie et les concepts scientifiques ce que l'atome est pour la matière et les particules élémentaires. Ainsi, bien que les particules élémentaires (électrons, protons, neutrons) composent la matière, c'est l'atome, qui résulte de leurs interactions, qui permet d'expliquer la structure de la matière. De manière analogue, c'est le modèle (ou en un ensemble de modèles) qui résulte de l'organisation des concepts et des lois qui rend une théorie cohérente et consistante.

Compte tenu de l'importance des modèles, Augustin (2015, p. 1245) rapporte de Frigg et Hartmann (2012): « Scientists spend a great deal of time building, testing, comparing and

revising models, and much journal space is dedicated to introducing, applying and interpreting these valuable tools. In short, models are one of the principal instruments of modern science. »

La construction de modèles n'est pas exclusive aux scientifiques. Toute personne construit des modèles mentaux pour arriver à connaître les objets qui l'entourent et à se les représenter dans l'esprit d'après ce qu'a rapporté Halloun (2007) de Wells, Hestenes et Swackhamer (1995). D'autre part, selon Johnson-Laird (1998), toute notre connaissance du monde dépend de notre capacité à en construire des modèles.

En enseignement, on imagine difficilement la compréhension des propriétés et des transformations de la matière à partir des particules élémentaires (électrons, protons, neutrons). C'est plutôt un ensemble de particules élémentaires en interaction qu'on appelle « particule » qui permet comprendre la matière. De la même façon que la particule explique la matière, le modèle permet de saisir une théorie. Par exemple, pour comprendre la théorie de la mécanique classique de Newton, il est important de comprendre plusieurs modèles, par exemple : le modèle de la particule libre, le modèle de la particule uniformément accélérée, le modèle de l'oscillateur harmonique, le modèle de l'oscillateur anharmonique, le modèle du rotateur rigide, le modèle du rotateur non rigide. Mais, pourquoi choisir le modèle particulière en particulier ?

1.4.2. Le modèle particulière³ : un contenu scientifique fondamental

Le modèle particulière est largement reconnu comme étant un modèle fondamental dans les sciences modernes (Williamson, 2008). Pullman (1995) rapporte, d'après Richard Feynman, qu'en cas de cataclysme scientifique futur, l'idée scientifique la plus consistante et la plus importante qu'on devrait transmettre aux générations futures serait celle du modèle particulière :

³ Le modèle particulière est parfois appelé le modèle corpusculaire. Cependant, c'est l'appellation « modèle particulière » qui est utilisée dans le programme de formation, dans la progression des apprentissages et dans plusieurs manuels scolaires.

Si toute la connaissance scientifique disparaissait dans un cataclysme, quelle phrase unique pourrait préserver le maximum d'information pour les générations futures ? Comment pourrions-nous leur transmettre au mieux notre compréhension du monde ? Je propose : « Toutes choses sont faites d'atomes, petites particules animées d'un mouvement incessant, qui s'attirent lorsqu'elles sont distantes les unes des autres, mais se repoussent lorsqu'on les force à se serrer de trop près. » Cette seule phrase contient, vous le verrez, une quantité énorme d'information sur le monde, pour peu que l'on y mette un peu d'imagination et de réflexion. (Pullman, 1995, p. 7)

Par ailleurs, Garcia et Taber (2009, p. 1924) mentionnent que le programme en science de l'école anglaise s'articule autour de cinq idées clés dont le modèle particulaire : « The five key scientific ideas that underpin the Key Stage 3 programme of study are: cells, interdependence, particles, forces [and] energy ». (DfES, 2002)

Ce modèle est tellement important qu'il est introduit dans plusieurs pays dès l'ordre d'enseignement secondaire et son apprentissage se poursuit même à l'université pour ceux et celles qui choisissent la branche scientifique. Au Québec, il est prescrit à la première année du deuxième cycle du secondaire (la troisième année du secondaire) dans le PFEQ.

Il postule la nature particulaire de la matière ainsi que les comportements des particules. Ce qui permet de représenter, d'expliquer et de prédire l'organisation de la matière, ses propriétés et ses transformations comme nous le verrons dans le deuxième chapitre.

1.4.3. Des problèmes associés à l'apprentissage de la nature des modèles et du modèle particulaire

Plusieurs recherches ont montré que les élèves, de tous les niveaux y compris ceux de l'ordre collégial et de l'ordre universitaire, ont des difficultés dans l'apprentissage de la nature des modèles en général et du modèle particulaire en particulier. En effet, les élèves ont des difficultés à comprendre ce qu'est un modèle scientifique. Des conceptions non scientifiques associées à sa nature et à ses fonctions sont relevées chez eux (Grosslight, Unger, Jay et Smith, 1991; Gogolin et Kruger, 2018)

Par ailleurs, plusieurs recherches ont montré que les élèves ont des difficultés à assimiler la nature particulière de la matière (Adbo et Taber, 2009; Franco et Taber, 2009). Malgré l'utilisation des termes « atome et molécule », plusieurs élèves n'ont pas abandonné la conception continue de la matière (Ben-Ziv, Eylon, et Siberstein, 1986).

Plus de 52 conceptions non scientifiques concernant les propriétés des particules ont été identifiées chez des élèves du secondaire (Griffiths et Preston, 1992). Ces conceptions peuvent être regroupées dans 11 catégories, sept en relation avec les molécules d'une substance pure et quatre sont associées aux atomes.

1.5. Synthèse et questions de recherche

Le développement d'une culture scientifique constitue l'un des éléments qui légitime l'enseignement de la science. Malheureusement, des enquêtes ont montré que cette culture présente des lacunes au Québec. De plus, les élèves sont de moins en moins attirés par des carrières scientifiques et leurs résultats en science sont en décroissance.

Ces constats révèlent la nécessité d'analyser l'enseignement de la science. Cette analyse étant vaste, il est donc important de la canaliser en considérant des objectifs plus réalistes.

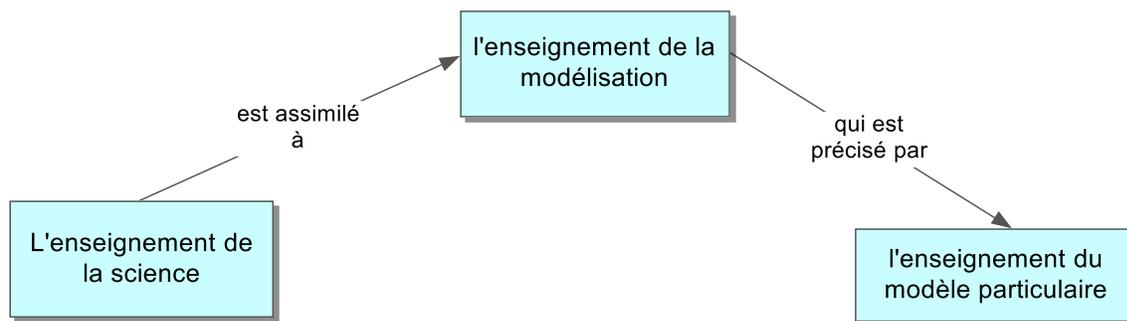


Figure 1 : De la science au modèle particulaire

Pour ce faire, nous supposons d'abord que l'enseignement de la science pourrait être assimilé à celui de la modélisation, nous nous intéressons alors à l'enseignement de la modélisation que nous spécifions en considérant le cas particulier du modèle particulière (figure 1).

À première vue, cette assimilation semble grossière, mais en l'examinant attentivement, on se rend compte qu'elle est fondée sur plusieurs raisons. Premièrement, la modélisation est une activité clé en science (« faire la science »). Deuxièmement, cette activité a pour but d'élaborer des modèles scientifiques (développer le contenu scientifique) qui sont des unités de base des théories tel que mentionné déjà. Troisièmement, cette élaboration permet de mettre en évidence la nature des modèles scientifiques, ce qui contribue à la compréhension de la nature de la science en général.

Parmi les modèles scientifiques, le cas du modèle particulière a été retenu. L'enseignement de ce modèle rend l'analyse de l'enseignement de la modélisation plus explicite, car il précise les propos. Aussi, la figure 2 montre que cet enseignement a les mêmes objectifs que l'enseignement de la modélisation, lesquels sont en commun avec ceux de l'enseignement de la science. En effet, l'enseignement du modèle particulière permet d'acquérir ses énoncés (qui représentent un contenu scientifique), de rendre accessible la modélisation (qui est une démarche scientifique) et de comprendre sa nature, ce qui contribue la connaissance de la nature de la science. De plus, Ce modèle est, d'une part, fondamental à la compréhension de l'univers matériel et, d'autre part, accessible aux élèves du secondaire.

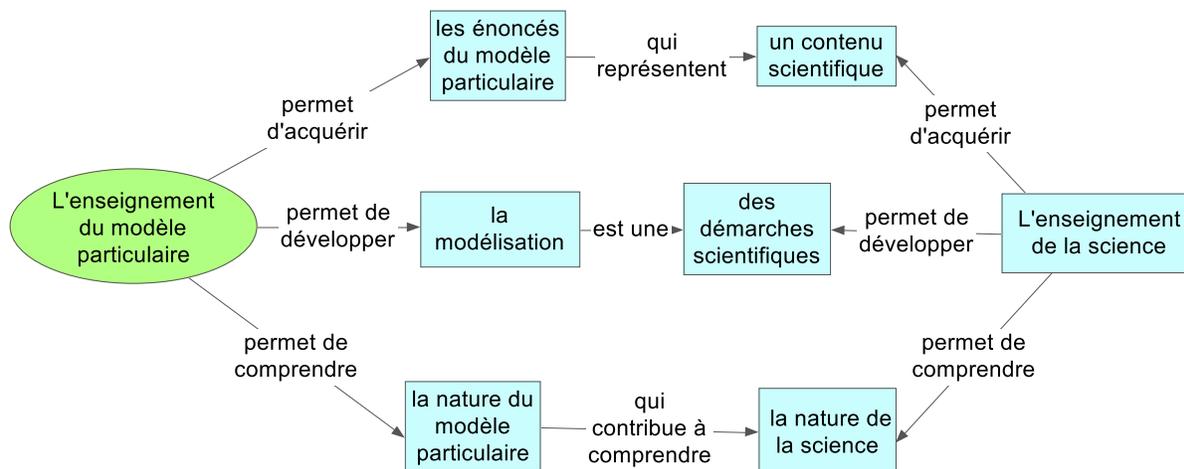


Figure 2 : Enseignement du modèle particulière pour simuler l'enseignement de la science

Supposer que l'enseignement de la science pourrait être assimilé à celui de la modélisation et du modèle particulière conduit aux questions de recherche ci-dessous.

Comment une analyse didactique de l'enseignement de la modélisation au secondaire contribue-t-elle à cerner les causes de difficultés de l'enseignement de la science ?

Comment une analyse didactique de l'enseignement du modèle particulière au secondaire permet-elle de clarifier les causes des difficultés de l'enseignement de ce modèle en particulier et de la modélisation en général ?

C'est pour tenter de répondre à ces questions que nous avons entrepris cette recherche.

Chapitre 2. Le cadre conceptuel

Introduction

Nous avons vu au chapitre précédent que nous nous intéressons à l'enseignement de la modélisation et à l'enseignement du modèle particulière. Le présent chapitre contient deux sections. Dans la première section, nous présentons les résultats des travaux de recherche qui concernent l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulière. Dans la deuxième section, nous exposons les concepts fondamentaux de la didactique sur lesquels se sont appuyés nos propos et nos analyses didactiques.

2.1. L'analyse de l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière

L'enseignement résulte de la mise en œuvre du curriculum formel et du curriculum caché. Le curriculum formel (ce qui se trouve dans les documents officiels) est destiné à des milliers d'élèves. Comme il est impossible de tenir compte des caractéristiques de chaque élève, le curriculum formel est conçu pour un « élève abstrait » dont l'enseignant est lui aussi « abstrait » (Perrenoud, 1993). Enseignant et élève sont dans un contexte également abstrait.

Concrètement, chaque élève, chaque enseignant ainsi que le milieu dans lequel ils se trouvent ont des caractéristiques. Ces dernières, dont le curriculum formel ne parle pas explicitement, constituent le curriculum caché. Dans ce qui suit, nous emploierons le mot informel plutôt que caché pour éviter la connotation négative de ce dernier. En effet, on pourrait prétendre : « l'école enseigne autre chose ou davantage que ce qu'elle annonce. On se trouve dès lors sur un terrain brûlant : que cache le caché ? Pourquoi certains effets de la scolarisation restent-ils obscurs pour les intéressés ? » (Perrenoud, 1993, p. 61)

Le curriculum réel est le produit de la combinaison du curriculum formel et du curriculum informel. C'est « celui des expériences que vit l'apprenant et qui le transforment » (Perrenoud,

1993, p. 62). C'est donc celui dont les apprentissages découlent réellement. Ainsi, pour analyser l'enseignement, il est important de considérer à la fois le curriculum formel et le curriculum informel.

2.1.1. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans les curriculums formels

Le curriculum formel est l'ensemble des documents officiels. Par exemple, au Québec, le curriculum formel est constitué de documents tels que le programme de formation de l'école québécoise (PFEQ), la progression des apprentissages (PDA), le cadre d'évaluation, les épreuves de la science et de la technologie, les manuels scolaires, les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage.

Dans les manuels scolaires de différents pays, il existe de nombreuses lacunes : des lacunes en lien avec la modélisation comme étant une activité scientifique, des lacunes associées au concept de modèle comme étant à la fois un produit de la modélisation et un contenu scientifique, et des lacunes en lien avec la nature de la science.

La modélisation implique, d'une part, la construction de modèles à partir de problèmes et, d'autre part, l'utilisation de modèles pour résoudre des problèmes. Malgré l'importance de la construction des modèles, celle-ci est presque inexistante dans les manuels. Quant aux utilisations des modèles, bien qu'elles soient parfois présentes, elles ne tiennent pas compte des limites des modèles. À ce propos, Martinand et al. (1992, p. 8) dénoncent une dogmatisation de l'enseignement de la science et notent :

Ce qui domine dans les manuels et les exercices, c'est une imposition d'un point de vue, d'un mode de description, d'une interprétation. Les modèles sont là, mais comme des vérités indiscutables; ce qui disparaît, c'est leur caractère hypothétique de constructions élaborées pour prédire ou expliquer, l'idéalisation des « descriptions factuelles » qui puissent donner prise à l'explication théorique. Les précautions d'usage sont encore pires : elles érodent la confiance dans les énoncés, sans marquer vraiment leurs limites, liées à leurs modalités de production.

Par rapport au concept de modèle, il n'est pas toujours facile de distinguer, dans les manuels par exemple, ce qui relève de la réalité que le modèle tente d'expliquer de ce qui relève du modèle lui-même (Astolfi, 1992).

Qu'en est-il du Québec ? Les lacunes citées ci-dessus figurent-elles dans le curriculum formel québécois ?

Au Québec, pour résoudre les problèmes d'ordre scientifique et technologique, le programme de formation mentionne le recours à plusieurs démarches dont la modélisation. Elle est définie comme suit :

La démarche de modélisation consiste à construire une représentation destinée à concrétiser une situation abstraite, difficilement accessible ou carrément invisible. Le modèle élaboré peut prendre diverses formes : texte, dessin, formule mathématique, équation chimique, programme informatique ou maquette. (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 25).

Cependant, on pourrait se demander quand et comment amener les élèves à utiliser une telle démarche. Par exemple, pour quel problème ou réalité les élèves sont-ils amenés à construire un modèle ? Quel modèle les élèves sont-ils amenés à construire ?

Le modèle particulière fait partie des concepts prescrits de l'univers matériel. Compte tenu de la progression des apprentissages, il est explicitement cité dans le programme de la première année du deuxième cycle (troisième année secondaire). Qu'en est-il de son processus d'enseignement ? Le modèle particulière est-il construit par les élèves suivant la démarche de modélisation ?

Ainsi, les documents officiels mentionnent bien la démarche de modélisation. Cependant, plusieurs questions sont soulevées par rapport aux problèmes qui lui sont associés et aux modèles qu'elle produit, en particulier le modèle particulière.

En somme, il est important de procéder à une analyse de tout ce qui concerne la modélisation et le modèle particulière dans le curriculum formel de l'école québécoise. Cette analyse sera

en fonction de critères inspirés des concepts fondamentaux de la didactique. Nous présentons ces concepts fondamentaux dans la section 2.2.

2.1.2. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le curriculum informel

Le curriculum informel comprend les contraintes du milieu scolaire, les représentations sociales des enseignants ainsi que leurs choix didactiques. Ce curriculum présente lui aussi des lacunes. Par exemple, les activités de construction de modèle ne semblent pas être privilégiées par la majorité des enseignants (Justi et Gilbert, 2002; Van Driel et Verloop, 2002; Henze, van Driel et Verloop, 2007). Bien que certains enseignants proposent des activités où les élèves sont amenés à construire eux-mêmes des modèles, d'autres enseignants se concentrent sur l'enseignement du contenu des modèles. Leur choix semble en lien avec leur perception des habiletés de leurs élèves. Ces enseignants pensent que la construction de modèles dépasse les aptitudes de leurs élèves (Van Driel et Verloop, 2002).

Concernant la nature des modèles, plusieurs études ont montré des connaissances limitées chez certains enseignants. Par exemple, dans une étude menée par (Van Driel et Verloop, 1999), les enseignants devaient dire ce que représentait pour eux un modèle parmi des objets qui leur ont été proposés dont une voiture en jouet, une photographie de maison, la loi d'Ohm, la molécule d'eau. Bien que tous les enseignants soient d'avis qu'un modèle est une représentation simplifiée de la réalité, leurs réponses étaient très divergentes. Certains enseignants ont considéré tous ces objets comme des modèles; d'après eux, ce sont des représentations simplifiées de la réalité. Alors que d'autres n'ont classifié aucun de ces objets comme modèle y compris la molécule d'eau. D'après ces derniers, un modèle devrait avoir un pouvoir explicatif et aucun de ces objets ne satisfaisait ce critère.

Dans la même étude et par rapport aux fonctions d'un modèle, les enseignants ont bien mentionné les fonctions descriptive et explicative, mais très peu ont considéré la fonction prédictive.

De plus, tous les enseignants s'entendent sur le fait qu'il existe une relation entre le modèle et sa cible. Cependant, certains enseignants (une minorité) ont une approche positiviste de cette relation. Pour eux, un modèle devrait être le plus proche possible de la réalité. Au contraire, la majorité des enseignants pensent que plusieurs modèles peuvent décrire la même cible, chacun d'eux étant associé à un aspect en particulier (Van Driel et Verloop, 1999).

Quant à l'aspect social d'un modèle, tous les participants, y compris ceux qui ont une vision positiviste de la relation entre le modèle et sa cible, sont d'avis que les modèles représentent les idées de scientifiques pour lesquelles la créativité est un facteur déterminant (Van Driel et Verloop, 1999).

Au Québec, une étude exploratoire a été réalisée dans le contexte du PFEQ auprès de cinq enseignants en science et technologie au secondaire (Roy et Hasni, 2014). Les auteurs de cette étude ont également montré que les participants ont une compréhension partielle de la nature et des fonctions d'un modèle. Ces résultats ont été obtenus à partir d'une analyse thématique du contenu selon une approche mixte qui tient compte à la fois des unités de sens préétablies et d'autres nouvelles, construites à partir d'une entrevue de groupe semi-structurée de 90 minutes.

Une autre étude en lien avec les modèles et la modélisation a été menée au Québec dans le contexte du PFEQ (Aurousseau, 2017). Il s'agit d'une étude collaborative qui a pour but d'analyser et les pratiques d'enseignement centrées sur les modèles et la modélisation ainsi que les ajustements, considérés par les enseignants, de ces pratiques. L'étude a impliqué la collaboration de quatre enseignants de science et technologie au deuxième cycle du secondaire. Les données ont été recueillies à partir des observations de quatre pratiques

d'enseignement et des discussions de groupe. Les quatre pratiques se rapportent à une construction d'un simulateur de péristaltisme à partir d'une gamme de fabrication et d'un prototype déjà existant et à des laboratoires où l'enseignant explique étape par étape aux élèves quoi faire. Les résultats de l'étude ont montré que l'activité de modélisation n'exige aucun engagement intellectuel des élèves. En enseignement, les modèles sont souvent présentés aux élèves comme des objets finis et figés. De plus, leurs caractéristiques ne sont pas explicitées lors de leur utilisation par les enseignants.

L'enseignement implicite des modèles et de la modélisation est aussi mis en évidence par Gray et Rogan-Klyve (2018) qui ont montré que la nature des modèles, le processus de modélisation et tout ce qui concerne la métamodélisation ne sont pas vraiment expliqués aux élèves.

Comme pour le curriculum formel, une analyse de tout ce qui concerne l'enseignement de la modélisation et du modèle particulier dans le curriculum informel de l'école québécoise est importante à effectuer. Cette analyse sera en fonction de critères inspirés des concepts fondamentaux de la didactique présentés dans la section 2.2.

2.1.3. L'analyse des apprentissages de la nature des modèles et du modèle particulier chez les élèves

Dans le premier chapitre, nous avons abordé la présence de difficultés dans l'apprentissage des modèles et du modèle particulier. Dans ce qui suit, nous présentons plus en détail plusieurs de ces difficultés ainsi que des conceptions chez les élèves en lien avec cet apprentissage. Bien que notre thèse concerne les élèves de l'ordre secondaire, nous nous sommes permis d'inclure quelques études impliquant des étudiants universitaires et de l'ordre du CEGEP. En effet, nous assumons que si ces derniers ont des difficultés données, il est très probable qu'elles soient partagées par des élèves de l'ordre secondaire.

2.1.3.1. Les conceptions associées à la nature des modèles

Concernant la nature des modèles scientifiques, l'étude de Grosslight, Unger, Jay et Smith (1991) a permis d'identifier trois niveaux de compréhension des modèles. La majorité des élèves se situent au premier niveau. Ces élèves croient que les modèles sont les copies conformes des objets ou des phénomènes du monde réel.

Certains élèves atteignent le deuxième niveau. Bien que ces derniers ne croient pas que les modèles sont des copies des objets réels, ils considèrent quand même que les modèles sont des reproductions simplifiées ou approximatives d'objets ou de phénomènes. Par ailleurs, pour ces élèves les modèles servent à la communication.

Seuls les experts satisfont le troisième niveau. Ils conçoivent les modèles comme des idées qui permettent d'expliquer un phénomène ou des données empiriques. Pour eux, les modèles sont construits et développés. Ils représentent donc des outils à la fois de la pensée et de la communication.

De plus, cette même étude montre que comparativement aux experts pour qui les modèles sont perfectibles, les élèves croient que les modèles sont remplacés par d'autres lorsqu'ils s'avèrent faux.

2.1.3.2. Les conceptions associées à la nature particulière de la matière

Pour représenter un gaz dans un flacon fermé, des élèves de troisième année secondaire dessinent des lignes sous formes de vagues plutôt qu'un ensemble de particules (Krajcik, 1989). Une grande majorité des élèves du primaire et secondaire n'arrivent pas à concevoir le vide entre les particules d'un gaz. Ce pourcentage diminue chez les étudiants des ordres collégial et universitaire, mais ne s'annule malheureusement pas, ce qui implique que les conceptions des apprenants associées à la nature particulière de la matière ne disparaissent pas vraiment avec l'âge (Novick et Nussbaum, 1981).

Dans une étude longitudinale (sur trois années) impliquant des élèves du niveau scolaire 7, 8 et 9, Johnson (1998) montre que l'aspect particulaire de la matière s'acquiert de manière progressive. Le passage du modèle continu de la matière au modèle particulaire peut nécessiter des modèles intermédiaires. Il identifie alors quatre modèles, chez les élèves, pour décrire une substance : 1- modèle X, la matière est continue (ces élèves n'ont représenté dans aucun dessin des particules, l'idée de particule n'a pas de sens pour eux); 2- modèle A, la substance est continue et comporte des particules (les élèves dessinent des particules et disent que la substance est entre les particules, certains élèves disent que les particules font partie de la substance, d'autres sont d'avis contraires); 3- modèle B, les particules constituent la substance, mais ces particules ont les mêmes caractéristiques macroscopiques que la substance; 4- modèle C, les particules constituent la substance et c'est la collectivité des particules qui donne à la substance ses propriétés caractéristiques.

2.1.3.3. Les conceptions associées aux particules

Parmi les conceptions des élèves en relations avec les particules qui sont identifiées chez le tiers des participants des élèves du secondaire, nous retrouvons les suivantes : 1- les molécules d'eau contiennent des atomes autres que l'oxygène et l'hydrogène, 2- les molécules d'eau n'ont pas toutes la même composition, 3- les molécules d'une substance pure peuvent avoir des tailles et des formes différentes selon l'état de la substance, 4- les molécules d'une substance pure ont des masses différentes selon l'état de la substance, 5- tous les atomes ont la même masse, 6- les atomes sont vivants, car ils bougent (Griffiths et Preston, 1992).

2.1.3.4. Les conceptions associées aux particules d'un gaz

Dans l'étude mentionnée précédemment, Novick et Nussbaum (1981) se sont également intéressés aux conceptions des élèves et des étudiants sur d'autres aspects du modèle particulaire. Ces aspects, qui sont associés aux particules d'un gaz dans un contenant fermé, sont : 1- la distribution uniforme des particules, 2- le mouvement des particules et 3- l'effet de la température sur le mouvement des particules.

Concernant le premier aspect, l'étude montre que 15 % des étudiants des ordres d'enseignement collégial et universitaire n'ont pas opté pour une distribution uniforme des particules d'un gaz. Ce pourcentage augmente à 60 % chez les élèves du primaire et du secondaire.

Les résultats relatifs au deuxième aspect montrent que le pourcentage des participants qui attribuent correctement la distribution uniforme des particules du gaz à leur mouvement constant est de seulement 10 % chez les élèves du primaire et du secondaire, de 40 % chez les étudiants de l'ordre collégial et de 50 % chez les universitaires.

Finalement, par rapport au troisième aspect, seulement 15 % des étudiants universitaires expliquent que lorsque la température diminue, les particules ont moins d'énergie et par conséquent bougent moins. Dans les autres ordres d'enseignement, ce pourcentage est encore inférieur à 15 %. Cependant, plus de participants ont réussi à expliquer qu'une augmentation de température entraîne des mouvements plus rapides des particules (50% d'universitaires, 40 % des étudiants de l'ordre collégial et 10 % d'élèves au secondaire).

2.1.3.5. Les conceptions associées aux particules dans les trois états de la matière

Plusieurs conceptions des élèves relatives aux trois états de la matière existent chez les élèves du niveau scolaire 7, 8 et 9 qui utilisent le mot particules (Johnson, 1998; Adbo et Taber, 2009). Ces conceptions concernent la distance entre les particules dans les trois états de la matière, le mouvement intrinsèque des particules et les forces entre les particules.

1- Plusieurs élèves pensent que les distances entre les particules d'un liquide sont supérieures à celles entre les particules d'un solide. De plus, en général, l'espace relatif entre les particules d'un gaz est sous-estimé. 2- Le mouvement des particules est négligé, les élèves pensent que les particules sont statiques, en particulier celles d'un solide. 3- Très peu d'élèves évoquent les interactions entre les particules, même à l'état solide où elles sont fortes.

2.1.3.6. Les conceptions associées à l'organisation de la matière

Sanger (2000) a proposé une activité à 65 étudiants universitaires. Il leur a proposé cinq dessins de particules (figure 3) et leur a demandé de les classer selon l'état de la matière (solide, liquide et gazeux), selon la composition physique (substance pure, mélange homogène et mélange hétérogène), selon la composition chimique (élément⁴, composé, un mélange à la fois d'élément et de composé). Les étudiants devaient expliquer leur classement.

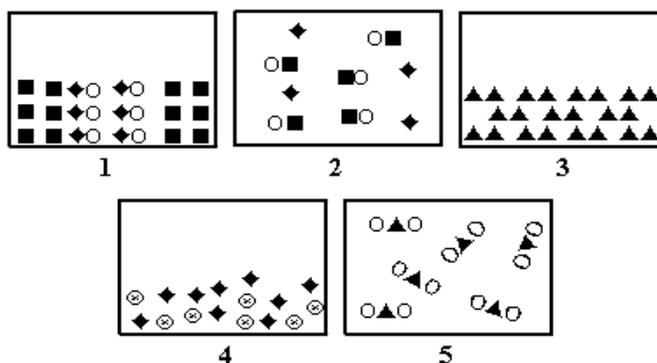


Figure 3 : Dessins des particules à classer

D'après le tableau 3 ci-dessous, 29 étudiants sur 65 confondent le concept d'élément et celui de substance pure. Ils ne distinguent pas non plus le concept de composé de celui du mélange homogène. Bien que sept étudiants aient bien identifié le mélange hétérogène (dessin 1) et les mélanges homogènes (dessins 2 et 4), ils ont classé une substance pure (dessin 5) comme étant un mélange homogène.

⁴ Le mot élément désigne une substance pure simple. Il est donc indivisible physiquement ou chimiquement en d'autres substances.

Tableau 3 : Résultats de l'activité selon Sanger (2000)

	Substance pure		Mélange	
	Élément	Composé	Homogène	Hétérogène
Réponse correcte de six étudiants	Dessin 3	Dessin 5	Dessins 2 et 4	Dessins 1
29 étudiants	Dessin 3		Dessin 5	Dessins 1, 2 et 4
7 étudiants	Dessin 3		Dessin 2, 4 et 5	Dessin 1

Des difficultés à classer la matière en substances pures, mélanges, etc. sont également observées chez des étudiants universitaires. C'est ce qu'a révélé une étude entreprise auprès de 804 étudiants inscrits dans une université des États-Unis au département de chimie (Stain et Talenquer, 2007).

Ces étudiants proviennent de six groupes différents (groupe de chimie général de niveau 1, groupe de chimie générale au niveau 2, groupe de chimie général enrichi, groupe de chimie physique et groupe de chimie organique). L'étude avait pour but d'identifier les critères et les modèles de raisonnement qu'utilisent les étudiants non gradués pour classer une substance en élément, composé ou mélange.

Les résultats de l'étude ont montré que certains étudiants confondent les concepts d'atome et d'élément. Il y a également une confusion entre molécule et composé. Pour ces étudiants, dès qu'une substance est constituée de molécules et non d'atomes individuels c'est un composé, par exemple, le gaz dihydrogène est un composé et finalement, les étudiants confondent les concepts de composé et de mélange.

2.1.3.7. Les conceptions associées aux changements physiques

Nous considérons, dans cette section, les conceptions en lien avec la dissolution et les changements d'états.

Conceptions associées à la dissolution

Dans une étude longitudinale, Abraham, Williamson, et Westbrook (1994) ont examiné les conceptions de 300 participants sur cinq concepts dont la dissolution. Les participants sont dans des niveaux scolaires différents : 100 élèves sont au 9^e niveau, 100 aux 11^e et 12^e et les 100 derniers sont à l'université (inscrits au premier cours de chimie générale). L'activité consiste à décrire en mots et en dessins ce qui se passe lorsqu'un morceau de sucre se dissout dans l'eau.

Les résultats montrent que 11,3 % des participants sont incapables d'expliquer le processus de dissolution (soit qu'ils ne fournissaient aucune réponse, soit que leurs réponses ne sont pas suffisamment claires pour être analysées). 28 % des participants ont des conceptions non scientifiques, par exemple, 9% des participants du niveau 9, 17 % des participants de niveau 11 et 12 et 9 % des universitaires disent que le sucre flotte ou coule dans l'eau. 33,3 % des participants ont une compréhension partielle du phénomène et seulement 27,3 % comprennent la dissolution et disent que le sucre se mélange à l'eau au niveau moléculaire.

Dans une étude plus récente, Adadan et Savasci (2012) identifient 21 conceptions non scientifiques dans le domaine de la chimie des solutions dont sept concernent la nature des solutions et la dissolution. Les participants sont au nombre de 756 et de niveau scolaire 11. Comme exemple de résultats : 15,2 % des élèves affirment que le sel de table disparaît lorsqu'il est dissout dans l'eau, 20 % des élèves disent que le sel de table fond dans l'eau, 15 % des participants pensent que le sel de table se transforme en liquide lorsqu'il est mélangé à l'eau, 17,4 % des élèves disent que le sel de table réagit avec l'eau lorsqu'on mélange l'eau et le sel, etc.

Difficultés à expliquer les changements de phases

Pour explorer les conceptions que les élèves ont sur l'ébullition, l'évaporation, la condensation et la fusion de l'eau, Osborne et Cosgrove (1983) ont mené une étude auprès de 43 élèves de 8 à 17 ans. Plusieurs conceptions non scientifiques ont été notées :

1- Concernant les bulles formées lors de l'ébullition de l'eau, 18 élèves (de 8 à 16 ans) pensent qu'elles sont composées d'air, trois élèves (10, 12 et 14 ans) croient qu'elles sont formées de chaleur, six élèves (14, 15 et 17 ans) pensent que les bulles sont de l'oxygène et de l'hydrogène, seulement 16 élèves (de 13 à 17 ans) ont dit que les bulles sont de la vapeur d'eau.

2- Lorsque les élèves ont été questionnés au sujet de la condensation sur le couvercle, plusieurs ont répondu de manière superficielle en disant que c'est la vapeur qui se retransforme en eau, des élèves de 14 et 15 ans ont dit que l'oxygène et l'hydrogène se recombinent pour former de l'eau, seulement sept élèves (de 13 à 17 ans) ont répondu que la vapeur a perdu de la chaleur et les molécules d'eau se sont rapprochées.

3- Lors du processus d'évaporation, à la question « Qu'est-il arrivé à l'eau ? », quatre élèves (10 et 14 ans) ont répondu que l'eau s'est introduite dans les parois du flacon; 12 élèves (de 12 à 17 ans) pensent que l'eau s'est transformée en air et huit élèves (de 14 à 17 ans) ont employé le mot molécule en disant que des molécules d'eau se sont évaporées, car elles ont eu une énergie (les élèves n'ont pas pu expliquer l'origine de cette énergie).

4- Condensation : des glaçons sont mis dans un pot en verre, celui-ci est, après, bien fermé, sa surface extérieure est bien séchée, après 20 minutes, cette surface devient humide, les élèves sont alors questionnés sur la provenance de l'eau. Dix élèves (de 10 à 17 ans) pensent que l'eau a traversé les parois du pot, huit élèves (de 12 à 17 ans) croient que la surface froide et l'air sec réagissent et produisent de l'eau, huit élèves (de 14 à 17 ans) ont dit que l'eau qui est dans l'air s'est posée sur le flacon.

5- En observant la glace fondre, les élèves reconnaissent bien le processus de fusion, mais ne sont pas capables de l'expliquer. Les auteurs rapportent que même si les élèves reconnaissent les processus et arrivent à les nommer, ils ne comprennent pas ce qui se passe lors des transformations physiques.

Plusieurs autres conceptions non scientifiques sont rapportées dans des études plus récentes, Canpolat, Pinarbasi, et Sozibilir (2006) en identifient sept dont : 1- un liquide doit être chauffé

pour qu'il s'évapore, 2- la vaporisation commence lorsque le liquide atteint son point d'ébullition.

Par ailleurs, des étudiants universitaires pensent que 1- si un liquide est à une température supérieure à celle de milieu, alors il ne s'évapore pas, 2- un liquide qui est dans un contenant hermétique (n'échange pas de chaleur avec le milieu) ne s'évapore pas (Canpolat, 2006). Ces deux dernières conceptions montrent que les étudiants pensent qu'il faut qu'un liquide acquière une énergie pour qu'il puisse s'évaporer alors que c'est le mouvement des particules qui est à l'origine de ce processus. Cette conception est un peu semblable à celle des élèves interviewés par Osborne et Cosgrove (1983) qui ont dit que l'eau ayant eu de l'énergie (sans savoir d'où) s'est évaporée.

2.1.3.8. Les conceptions associées aux changements chimiques

Le changement chimique a fait l'objet de plusieurs études dont celle de Andersson (1990) connue pour être une étude pionnière. Dans cette étude, Andersson identifie quatre conceptions non scientifiques du changement chimique chez les élèves, ainsi un changement chimique est : 1- une disparition (dans un changement chimique, une substance disparaît, par exemple une chandelle qui disparaît lors d'une combustion); 2- un déplacement (une substance se déplace lors d'un changement chimique, par exemple, l'eau qui provient de la combustion du bois était dans le bois et s'est juste déplacée); 3- une modification (dans un changement chimique, une substance est modifiée, par exemple, la combustion de l'alcool donne des vapeurs d'alcool); 4- une transmutation (par exemple, le fer qui se transforme en poudre de carbone lors d'une combustion ou la chandelle qui se transforme en flamme).

Ces représentations montrent bien non seulement une incompréhension du changement chimique, mais aussi une incompréhension de ce qu'est une substance; en effet, le fer qui devient carbone montre, comme nous l'avons vu précédemment, que les élèves identifient une substance (le carbone) à partir de son origine (le fer) et non à partir de ses propriétés.

Stavridou et Solomonidou (1998) suggèrent que le concept de changement chimique se construit de l'âge de 12 ans à 18 ans en passant par trois étapes. Dans la première étape, les élèves ne voient pas le changement chimique comme un changement, mais plus comme un phénomène ou un évènement, ces auteurs emploient l'expression « quelque chose arrive ». Dans la deuxième étape, les élèves le voient comme un mélange de deux substances qui produisent une autre substance. Ainsi, la dissolution du sucre dans l'eau est un changement chimique. Dans la troisième étape, à 18 ans en général, les élèves définissent le changement chimique en termes de structure moléculaire, mais un seul étudiant sur dix a lié le changement de structure moléculaire à l'apparition de nouvelles substances.

2.1.3.9. Attribution des propriétés macroscopiques aux particules

Plusieurs élèves ont des difficultés à distinguer les propriétés d'une substance des propriétés des particules qui la composent. Par exemple, 1- la pression affecte la forme des molécules d'une substance, 2- lorsqu'on chauffe une substance, ses molécules prennent de l'expansion, 3- les collisions entre atomes affectent leur taille (Griffiths et Preston, 1992), 4- les atomes provenant du fil métallique solide sont solides et, ont les mêmes propriétés que ce fil (malléabilité, conductibilité électrique, couleur) alors que les atomes du même fil chauffé, qui passe à l'état gazeux, sont gazeux (Ben-Ziv, Eylon, et Siberstein, 1986).

2.1.3.10. Difficultés à résoudre des problèmes conceptuels en lien avec le modèle particulaire

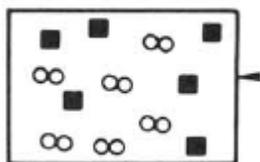
Dans leur étude Nakhleh et Mitchell (1993) ont proposé à des étudiants universitaires (inscrits dans un cours d'introduction à la chimie) deux types de résolution de problème : des résolutions de problème de type algorithmique (les étudiants suivent des étapes) et d'autres de type conceptuel (les étudiants expliquent et prédisent le comportement de particules à partir de représentations iconiques), les deux exemples ci-dessous illustrent ces deux types de résolutions.

Problème de type algorithmique

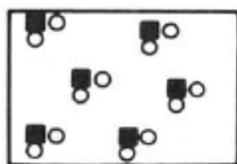
Calculer la masse maximale de SO_3 qui peut être produite à partir de 1,9 mole de dioxygène et un excès de soufre. $2\text{S} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$

Problème de type conceptuel

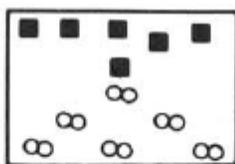
L'équation de l'oxydation du soufre est : $2\text{S} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$. Considérer un mélange de S (■) et d'oxygène (OO) dans un contenant fermé, tel qu'illustré ci-dessous :



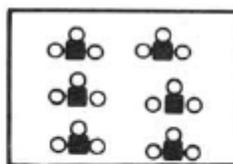
Quelle représentation parmi les suivantes correspond au produit ?



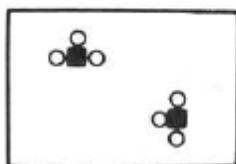
(a)



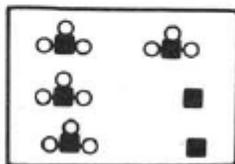
(b)



(c)



(d)



(e)

Les auteurs ont classé les résultats en quatre catégories : compétences algorithmiques élevées, compétences algorithmiques faibles, compétences conceptuelles élevées, compétences conceptuelles faibles.

Les résultats présentés dans le tableau 4 indiquent que plus de 51,7 % d'étudiants inscrits en cours de chimie ont des compétences conceptuelles faibles. D'après les auteurs, ces étudiants ne démontrent pas une compréhension des concepts.

Tableau 4 : Comparaison entre la résolution de problèmes de type algorithmique et la résolution de problème de type conceptuel selon Nakhleh et Mitchell (1993)

	Compétences algorithmiques élevées	Compétences algorithmiques faibles	Total
Compétences conceptuelles élevées	43,3%	5%	48,3%
Compétences conceptuelles faibles	41,7%	10%	51,7%
Total	85,0%	15%	

En plus du fait que les élèves ont des difficultés à résoudre les problèmes de type conceptuel, nous pouvons ajouter que l'enseignement basé sur les symboles engendre chez les élèves des difficultés à comprendre d'autres types de représentation (autre que le symbolique). Il est intéressant de signaler que Gabel (2005) rapporte, de Johnstone (1990), que la majorité des enseignements en chimie, aussi bien dans les collèges que dans les universités, s'effectuent avec des symboles ; Johnstone (1990) a estimé que le pourcentage de l'enseignement qui fait intervenir la dimension symbolique est de 70 %.

2.1.3.11. Difficultés à considérer un même phénomène à différents niveaux

Johnstone (1982) considère qu'un scientifique, en particulier un chimiste, étudie la matière en considérant trois niveaux : 1- niveau descriptif, dans lequel les phénomènes sont expérimentés, observés et décrits; 2- niveau explicatif dans lequel les phénomènes sont expliqués et 3- niveau de la représentation, dans lequel des symboles sont utilisés pour représenter et communiquer les phénomènes. Talanquer (2011) rapporte que, dans des travaux postérieurs, Johnstone (1991; 1993; 2000) associe clairement le niveau descriptif et fonctionnel à la dimension macroscopique où les phénomènes sont observables et tangibles, le niveau explicatif au niveau submicroscopique qui concerne le modèle des particules (modèle particulaire) et le niveau de la représentation à la dimension symbolique.

En effet, Johnstone (1993, p. 107) écrit :

The new chemistry has three basic components: the macrochemistry of the tangible, edible; the submicrochemistry of the molecular, atomic and kinetic and the representational chemistry of symbols, equation, stoichiometry and mathematics.

Selon Johnstone (1993), un scientifique passe aisément d'une dimension à une autre. Son travail consiste à observer des phénomènes ou à faire des expériences; les observations et les expériences relèvent de la dimension macroscopique. Il utilise ensuite des symboles et des formules mathématiques pour représenter et décrire ce qu'il a observé et ce qu'il a expérimenté; il s'agit de la dimension symbolique. Finalement, il interprète ses descriptions en les reliant aux comportements des particules; c'est la dimension submicroscopique. Johnstone (1993) évoque l'exemple de la neige qui tombe. Il écrit que quand la neige tombe, il pense à la beauté des toits et des arbres enneigés, il pense également à la forme hexagonale des flocons de neige et il pense également aux liaisons hydrogène qui sont entre les particules d'eau ainsi qu'à l'angle de liaison H-O-H qui est de 105° . Les enfants, quant à eux verraient la neige comme un matériau pour faire des boules de neige. Ce passage d'une dimension à l'autre, bien que spontané chez les scientifiques, est très complexe pour de jeunes étudiants ou des élèves. Ces derniers observent les phénomènes macroscopiques mais ne sont pas capables de les relier à l'échelle symbolique et submicroscopique.

2.1.3.12. Difficultés à interpréter différentes représentations

Par rapport à la visualisation, nous pouvons citer l'étude de Kozma et Russell (1997). Dans cette étude, les auteurs ont comparé les réponses d'un groupe de novices (composé de dix étudiants inscrits au premier semestre en chimie à l'université) et celles d'un groupe d'experts (onze chimistes professionnels). Pour ce faire, les auteurs ont proposé deux tâches aux deux groupes. Dans la première tâche, les auteurs ont proposé 14 présentations pour représenter une situation, par exemple une réaction chimique. Parmi ces représentations, il y a des vidéos, des graphes, des animations, des équations. Chaque représentation est identifiée par une lettre comme le montre la figure 4. Les participants devaient regrouper les lettres compte tenu du sens qu'ils donnaient aux représentations. Les résultats ont montré que des experts ont

effectué des groupements qui contenaient plusieurs lettres, ces groupements étaient larges et globaux : les experts arrivaient à identifier une situation à partir de ses diverses représentations par exemple, dans la figure 4, il s'agit de la même situation (réaction de décomposition de N_2O_4). Au contraire, les groupements des novices étaient plus petits, partiels et basés sur des caractéristiques superficielles.

Dans la deuxième tâche, les auteurs ont présenté des situations. Pour chacune d'elles, les participants devaient générer d'autres représentations, par exemple, une équation était présentée et les participants devaient générer le graphe correspondant. Les résultats ont montré une fois de plus que les experts étaient meilleurs que les novices lorsqu'il s'agissait de fournir des représentations équivalentes en particulier des descriptions verbales.

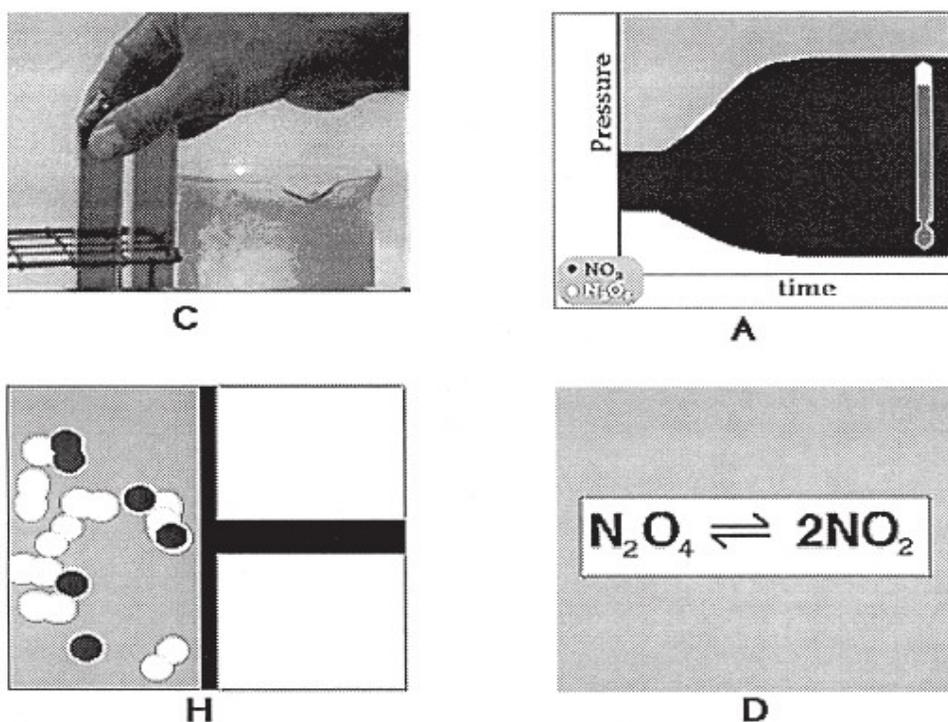


Figure 4 : Représentations de la réaction de décomposition de N_2O_4

Ainsi, cette étude montre bien que les novices ont des difficultés avec les différentes représentations d'une même situation. D'une part, ils ont du mal à identifier une même

situation à partir de différentes représentations (différentes soit par la dimension qu'elles représentent : macroscopique et submicroscopique soit par la forme utilisée : graphe, animation, vidéo, symboles, icônes, etc.) et, d'autre part, ils ont également des difficultés à générer différentes représentations pour une même situation en modifiant soit la dimension représentée ou les formes utilisées.

2.1.3.13. Difficultés persistantes

Pour clore cette section, soulignons qu'une étude, dans le cadre d'une réforme curriculaire en Angleterre (Franco & Taber, 2009), a montré que les élèves utilisent le concept de particule pour expliquer plusieurs phénomènes (changements d'états, la compressibilité, la flottaison, la diffusion, la miscibilité, les réactions chimiques, etc.). Cependant, ces explications révèlent des conceptions non scientifiques chez la majorité d'entre eux.

Tableau 5 : Résumé des études sur les difficultés en lien avec les modèles et le modèle particulière

Les thèmes des conceptions non scientifiques ou difficultés	Auteurs, année	Méthode	Participants
Enseignement et apprentissage des modèles et de la modélisation	Van Driel et Verloop (2002)	Méthode qualitative au moyen d'une entrevue semi-structurée	7 enseignants au secondaire dans le contexte d'une réforme de l'enseignement de la science aux Pays-Bas
		Méthode quantitative au moyen d'un questionnaire	74 enseignants (autres que les 7 premiers)
La nature des modèles scientifiques et de leurs fonctions	Roy et Hasni (2014)	Recherche exploratoire, méthode qualitative au moyen d'entrevues semi-structurées	5 enseignants au secondaire dans le contexte du PFEQ actuel (après la réforme)
Les pratiques d'enseignement	Aurousseau (2017)	Recherche collaborative	4 enseignants au 2 ^e cycle du secondaire dans le contexte du PFEQ actuel (après la réforme)
Les pratiques d'enseignement	Gray et Rogan-Klyve (2018)	Recherche exploratoire, méthode qualitative au moyen de l'observation d'enregistrement vidéos	2 enseignants de deuxième année secondaire
La nature des modèles scientifiques et de leurs fonctions	Grosslight, Unger, Jay et Smith (1991)	Recherche exploratoire, méthode qualitative au moyen d'entrevues	- 7 élèves de 1 ^{re} année secondaires, - 22 étudiants en 1 ^{re} année du collèges et 4 experts
	Gogolin et Kruger (2018)	Méthode mixte	285 étudiants du niveau 4 ^e année secondaire et CEGEP
La nature particulière de la matière et les particules dans les trois états de la matière	Johnson (1998)	Recherche longitudinal (3 ans), méthode qualitative au moyen d'entrevues et des cours	Des élèves de 11 à 16 ans

La nature particulière de la matière et les particules d'un gaz	Novick & Nussbaum (1981)	Méthode quantitative au moyen d'un test	576 participants du primaire à l'université
Les particules	Griffiths & Preston (1992)	Méthode qualitative au moyen d'entrevues semi-dirigées	30 élèves du niveau 1 ^{re} année CEGEP (12 ^e année)
L'organisation de la matière	Sanger (2000)	Méthode expérimentale (avec et sans enseignement impliquant des animations)	65 étudiants inscrits au 1er semestre à l'université en physique ou science de la vie
L'organisation de la matière	Stain & Talenquer (2007)	Méthode mixte au moyen d'une activité de classification et des entrevues	804 étudiants
Les changements de phases	Osborne & Cosgrove (1983)	Méthode qualitative au moyen d'entrevues	43 élèves de 10 à 17 ans
La dissolution	(Abraham, Williamson, & Westbrook (1994)	Méthode qualitative au moyen d'entrevues	100 participants du niveau 3 ^e année secondaire au niveau universitaire
Les changements chimiques	Stavridou & Solomonidou (1998)	Méthode qualitative au moyen d'entrevues	40 élèves de 12 à 18 ans
Les trois états de la matière et changements chimiques	Adbo & Taber (2009)	Méthode qualitative au moyen d'entrevues semi-dirigées dans le contexte de la réforme.	18 élèves suédois de 16 à 19 ans
Le concept de particule, changements d'états, la compressibilité, la flottaison, la diffusion, la miscibilité, les réactions chimiques	Franco & Taber (2009)	Méthode qualitative dans le contexte de la réforme curriculaire en Angleterre	48 élèves anglais de 1 ^{re} année secondaire à la 1 ^{re} année du CEGEP

Les difficultés à résoudre les problèmes conceptuels	Nakhleh & Mitchell (1993)	Méthode qualitative au moyen d'un questionnaire	60 étudiants
		Méthode qualitative au moyen d'une entrevue de 50 min	6 étudiants
Les difficultés à considérer les phénomènes à différents niveaux	Johnstone (1993); Johnstone (2000)	Article théorique	
Les difficultés à interpréter différentes représentations	Kozma & Russell (1997)	Méthode qualitative au moyen d'une tâche	10 étudiants au 1 ^{er} cycle, 8 en génie, 2 en science de la santé et 11 experts

2.2. Des concepts fondamentaux de la didactique

Pour cerner les difficultés qui pèsent sur l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière, il est indispensable de les analyser en fonction des concepts fondamentaux de la didactique. Cette section a pour but de présenter ces concepts. Elle commence par traiter la modélisation et les modèles scientifiques en faisant un détour par l'épistémologie. Ensuite, elle définit la progression des apprentissages d'un contenu scientifique et d'une activité scientifique, en l'occurrence, la modélisation; la modélisation en didactique; la visualisation qui est considérée comme un dispositif didactique en particulier pour la modélisation et finalement, la démarche didactique qui représente un soutien à l'apprentissage.

2.2.1. La modélisation et les modèles scientifiques

L'épistémologie occupe une place centrale en didactique des sciences. En effet, l'épistémologie a pour but de réfléchir sur la connaissance scientifique. Cette réflexion sert de levier à la connaissance scolaire (Thouin, 2014). Analyser la connaissance scientifique revient à examiner les processus de sa production et sa nature. Cela revient également à déterminer sa structure en identifiant ses éléments (lois, concepts, théories et modèles) et les relations qui existent entre eux. L'épistémologie est essentielle à la didactique de la science, car elle permet à la didactique de prendre en compte certains des éléments clés de la connaissance scientifique et d'en déduire des conséquences didactiques (Astolfi et Develay, 1989). Parmi ces éléments clés, nous présentons, dans ce qui suit, l'approche constructiviste, les problèmes en science, l'activité de modélisation et le concept qui en découle, c'est-à-dire le modèle scientifique.

2.2.1.1. Le constructivisme épistémologique

« Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit ». Cette célèbre formule de Bachelard rapportée par Astolfi et al. (2008, p54) illustre bien le constructivisme épistémologique. Cette approche soutient que le savoir est le résultat d'une construction intellectuelle (Astolfi et al.,

2008; Thouin, 2014). Tel que présenté plus loin, la modélisation permet de comprendre le fonctionnement de cette construction.

2.2.1.2. Les problèmes en science

Les problèmes sont parmi les éléments clés qui permettent la construction du savoir. Ainsi, en se basant sur Popper (1991) qui indique que la science commence par un problème et sur Bachelard (1938, p. 14) pour qui « *toute connaissance est une réponse à une question* » Orange (1997, p. 10) considère que « *le problème est à l'origine de la connaissance* ».

La relation entre un problème et un contenu scientifique mentionnée par Popper et Bachelard est étendue au contexte scolaire par Astolfi, Peterfalvi, et Vérin (1998, p. 176). Ces auteurs soutiennent :

Un savoir scientifique digne de ce nom ne se réduit jamais à l'établissement d'un énoncé, destiné à être mémorisé puis appliqué, même quand il s'accompagne d'observation et de manipulations. Il est d'abord le fruit de la résolution de problème [...]

2.2.1.3. La modélisation en science : une activité scientifique clé

L'épistémologie et l'histoire des sciences réfutent la conception simpliste de la construction des théories (Clement, 2000). Selon cet auteur, cette conception présente la construction des théories soit comme des inductions pures (des données empiriques vers les lois ou les théories) ou comme des déductions pures (des théories vers les tests empiriques). En plus des analyses abstraites de l'épistémologie et de l'histoire des sciences, des études empiriques, basées sur les pratiques de scientifiques, révèlent que le processus de construction des modèles est complexe (Clement, 2000).

Ce processus est bien illustré par le diagramme de Giere (1991) ci-dessous (figure 5) rapporté par Driver, Newton, et Osborne (2000). Ce diagramme distingue le monde réel du modèle. En effet, il est très important de distinguer les phénomènes et les entités du monde naturel des connaissances et des idées qui leur sont associées (Driver, Newton, et Osborne, 2000).

Par ailleurs, on observe quatre étapes dans le processus de construction d'un modèle. Ainsi, à partir de l'observation d'un phénomène (étape 1), un modèle est généré pour le représenter (étape 2). D'une part, il y a production de données empiriques au moyen d'observations ou d'expérimentations (étape 3) et, d'autre part, le modèle permet de prédire des données à partir de raisonnements ou de calculs (étape 4).

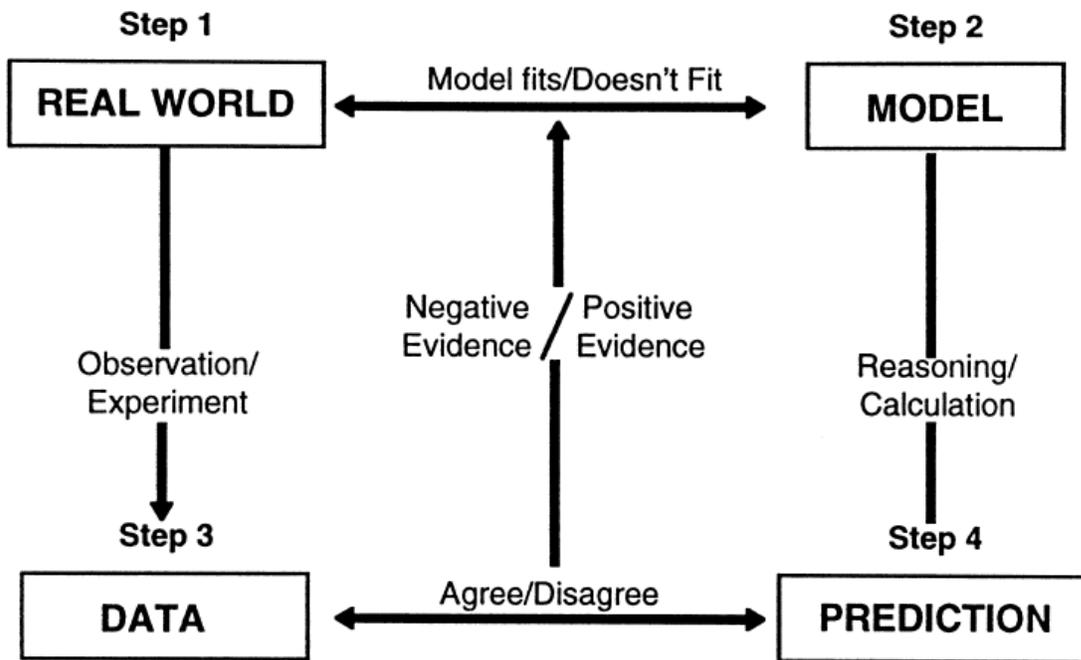


Figure 5 : Processus de construction des modèles (Giere, 1991)

Pour évaluer le modèle généré, les prédictions sont comparées aux données empiriques. Si les prédictions sont jugées égales aux données empiriques alors on postulera que le modèle est une représentation satisfaisante du phénomène. Celui-ci est alors considéré comme un modèle accepté. Sinon, dans le cas où les prédictions sont différentes des données empiriques, le modèle sera modifié jusqu'à ce que ses données (théoriques) convergent vers les données empiriques. Généralement, cette dernière condition implique plusieurs itérations. Ce processus est parfois représenté par l'acronyme OGEM pour observer, générer, évaluer et modifier (Williams et Clement, 2015).

2.2.1.4. Le modèle scientifique : un construit scientifique fondamental

Tout comme les problèmes et tel que nous l'avons mentionné dans la première partie de cette recherche, les modèles en science sont importants. Cette importance réside, entre autres, dans leur pouvoir explicatif. Ils permettent d'expliquer des phénomènes empiriques (Hempel, 1965 citée par Oh et Oh (2011)). Cependant, malgré le rôle crucial des modèles, il n'existe pas de définition unique à la notion de modèle. On pourrait se demander pour quelle raison il existe une multitude de définitions. Ces définitions ont-elles des points en commun ? En quoi sont-elles différentes ?

Répondre à ces questions permettrait sûrement à mieux comprendre le concept de modèle. C'est ce que nous nous proposons de faire dans les sections suivantes.

Le modèle : un médiateur entre un champ théorique et un champ empirique

Tel que mentionné précédemment, il n'y a pas de définition unique du concept de modèle. Une recherche bibliographique conduit à plusieurs définitions dont celles-ci. 1- un modèle est la représentation d'une idée, d'un objet, d'un événement, d'un processus, ou d'un système qui se concentre sur certains aspects du système (Gilbert, 1997) pour faciliter l'investigation scientifique (Ingram et Gilbert, 1991 cité par Bodner, Gardner et Briggs 2005). 2- Un modèle se rapporte à un système cible ou à un phénomène avec lequel il a un ou des résultats empiriques en commun (Norman, 1997). 3- Les modèles sont des outils qui incarnent les caractéristiques des phénomènes que la théorie définit comme importantes (Penner, Giles, Lehrer, et Schauble, 1997 citée par Bodner, Gardner, et Briggs (2005)). 4- Un modèle désigne un dispositif de recherche d'un niveau de complexité équivalent au phénomène, à l'organisation ou au système étudié (Thouin, 2017). 5- Un modèle est un instrument théorique construit en vue d'interpréter et de prévoir des événements concernant des phénomènes (Robardet et Guillaud, 1997). 6- Un modèle est une présentation qui sert d'arguments qui expliquent le monde naturel (Lehrer et Schauble, 2003; 2006 cité par Bamberger et Davis, 2011).

Trois éléments émergent de ces définitions. Premièrement, l'aspect théorique du modèle (le modèle est un dispositif de recherche d'après la 4^e définition; il est un instrument théorique d'après la 5^e définition), deuxièmement, l'aspect empirique du modèle (le modèle se rapporte à un phénomène d'après la 2^e définition; les modèles incarnent des caractéristiques de phénomènes d'après la 3^e définition); et finalement, l'aspect utilitaire du modèle ([...] pour faciliter l'investigation d'après la 1^{re} définition; les modèles sont des outils d'après la 3^e définition, etc.). Les deux premiers aspects (théorique et empirique) sont justifiés par le fait que tout modèle peut être considéré comme un médiateur entre un champ théorique et un champ empirique (Walliser, 1977). Pour comprendre cette médiation examinons les relations entre, d'une part, le modèle et la théorie et, d'autre part, le modèle et la réalité empirique.

La relation entre le modèle et la théorie

Par rapport à une théorie (figure 6), un modèle est un outil plus modeste (Robardet et Guillaud, 1997). Il est considéré comme **une approximation** de la théorie (Portides, 2007). Par exemple, dans le modèle moléculaire, pour étudier le mouvement des électrons, on considère que le mouvement des noyaux est négligeable. Cette approximation dite l'approximation de Born-Oppenheimer permet de séparer la fonction d'onde électronique de la fonction d'onde nucléaire et d'écrire la fonction d'onde totale comme un produit des deux premières fonctions. Ce produit a l'avantage de simplifier considérablement le formalisme mathématique. En théorie, la fonction d'onde totale est une fonction qui dépend à la fois des variables du noyau que de celles des électrons.

La relation entre le modèle et la réalité empirique : une réalité empirique locale

Par rapport à la réalité empirique, le modèle est incomplet. Il ne rend pas compte de tous ses phénomènes. Il privilégie quelques-uns qui sont jugés importants (Walliser, 1977). Ainsi, le modèle représente une réalité empirique locale en la circonscrivant à certains phénomènes déterminés (Robardet et Guillaud, 1997). Par exemple, le modèle particulaire permet d'étudier les phénomènes physico-chimiques de la matière, mais ne permet pas d'expliquer ses phénomènes spectroscopiques dus à son interaction avec la lumière.

En conséquence, une même réalité empirique peut être associée à plusieurs modèles. Par exemple, une substance peut être représentée, d'une part, par le modèle particulaire pour l'étude de ses transformations physiques et chimiques et, d'autre part, par le modèle de l'oscillateur harmonique pour l'étude de son spectre infrarouge, etc.

Finalement, par rapport à la réalité empirique locale, le modèle est imparfait, car il introduit des concepts étrangers à cette réalité. Par exemple, le concept de force, d'énergie, etc. sont définis pour soutenir les modèles (Walliser, 1977), mais ils n'ont pas de correspondant dans la réalité empirique.

La relation entre la réalité empirique et la réalité empirique locale

Tout comme le modèle est relié à la théorie, la relation empirique locale est en lien avec la réalité empirique. La relation entre ces deux réalités (figure 6) est appelée **une idéalisation** (Portides, 2007). Par exemple, pour étudier le mouvement d'un projectile, on assimile le projectile à une masse ponctuelle. Cette dernière est une idéalisation du projectile.

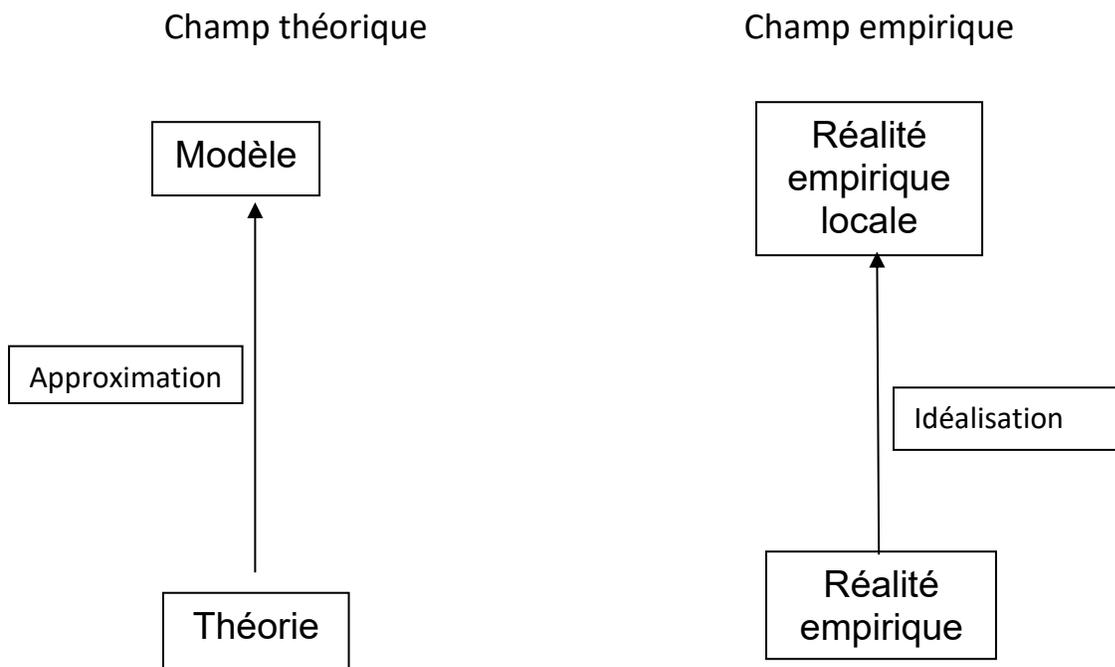


Figure 6 : Représentation de la relation d'idéalisation et d'approximation

Il est intéressant de souligner que, contrairement à une approximation, une idéalisation n'est pas une relation symétrique. En effet, dire que la fonction d'onde totale est approximativement égale au produit d'une fonction nucléaire par une fonction électronique revient strictement à dire que le produit d'une fonction nucléaire par une fonction électronique est approximativement égal à la fonction totale. Cependant, dire qu'un projectile est assimilé à une masse ponctuelle ne revient pas à dire qu'une masse ponctuelle est assimilée à un projectile (Portides, 2007).

Le modèle et son champ de référence

Des situations qui sont, en apparence, très différentes peuvent être expliquées par un même modèle (Robardet et Guillaud, 1997). L'ensemble des situations qui peuvent être expliquées par un même modèle constitue le champ de référence expérimental du modèle (Robardet et Guillaud, 1997). Ce champ constitue la portée du modèle. Par exemple, le modèle particulaire peut à la fois expliquer pourquoi on ne peut passer à travers un mur (on postule que les particules d'une substance solide sont retenues par des forces d'attraction importantes) et pourquoi des gouttelettes d'eau se déposent sur une cannette bien froide (le phénomène de la condensation).

Le modèle et de la réalité empirique locale : différents types de relations

Une fois que nous avons compris le rôle médiateur du modèle compte tenu de sa relation avec la théorie d'une part et avec la réalité empirique locale d'autre part, il serait intéressant d'examiner la deuxième relation (entre le modèle et la réalité empirique locale) en considérant les structures de ses deux systèmes (figure 7).

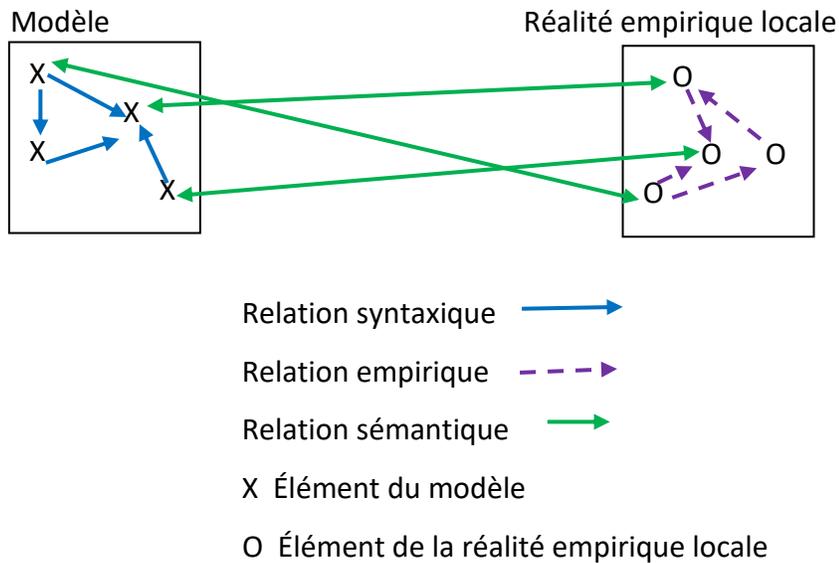


Figure 7 : Relations syntaxiques, empiriques et sémantiques (Robardet et Guillaud, 1997 p. 112)

Robardet et Guillaud (1997) mentionnent que le modèle est composé de concepts.

Les concepts constitutifs d'un modèle sont généralement reliés ou définis les uns par rapport aux autres par des relations posées axiomatiquement, principes, règles, théorèmes ou lois. Les concepts et les relations qui les relient constituent la structure, la syntaxe du modèle. (Robardet et Guillaud, 1997 p. 110).

Par ailleurs, la réalité empirique étudiée est structurée par un ensemble de relations dites relations empiriques (Robardet et Guillaud, 1997).

Le modèle est la réalité empirique locale dont il rend compte sont en lien par des relations dites empiriques. Ces relations existent car le modèle, qui est une entité construite du champ théorique, a pour fonction d'expliquer la réalité empirique locale dont les éléments sont judicieusement choisis pour la construction et la validation du modèle (Robardet et Guillaud, 1997). De là, on comprend le troisième aspect i.e. l'aspect utilitaire évoqué dans les définitions présentées précédemment. Cet aspect réside dans le pouvoir explicatif du modèle.

En résumé, ce petit exposé nous a permis d'identifier trois éléments essentiels du concept modèle : son aspect théorique, son lien avec une réalité empirique et son pouvoir explicatif de

cette réalité. Les définitions semblent multiples, car soit qu'elles considèrent l'un des trois aspects, soit qu'elles combinent deux aspects sur les trois, ce qui peut conduire à différentes combinaisons.

Évidemment, nous n'avons pas la prétention d'avoir trouvé LA fameuse définition unique, mais nous ne pouvons pas non plus nous empêcher de proposer une définition qui englobe les trois aspects à la fois :

Le modèle est une construction théorique en lien avec une réalité empirique. Grâce à sa structure plus simple que celle d'une théorie, il peut expliquer de manière économique des aspects ou des phénomènes de la réalité empirique en question.

Pour revenir à la fonction d'un modèle, celui-ci a non seulement une fonction explicative, mais aussi représentative et prédictive (Oh et Oh, 2011). D'après Halloun (2007), la représentation d'un système consiste à représenter l'état de ses différents constituants ou leurs comportements. L'explication consiste à dire pourquoi les constituants existent dans l'état où ils sont et pourquoi ils se comportent comme ils le font. Ainsi, la connaissance de ces causes (les pourquoi), permet de prédire de nouveaux comportements. Ce qui revient à la fonction prédictive des modèles scientifiques.

Finalement, un modèle peut avoir plusieurs formes. Walliser (1977) distingue les modèles physiques (les maquettes) des modèles symboliques. Ces derniers peuvent, à leur tour, être séparés en modèles verbaux, graphiques (icônes, diagrammes, cartes) ou mathématiques. De plus, il existe des modèles sous forme d'analogies qu'on appelle des modèles analogiques.

2.2.2. La progression des apprentissages de la modélisation

Il est important de distinguer les deux types de progression des apprentissages : la progression des apprentissages de la façon dont les élèves **comprennent** un concept donné (premier type) et la progression des apprentissages de la façon dont les élèves **devraient comprendre** un

concept donné pour le maîtriser (deuxième type). Bien que ces deux types de progression soient distincts, ils sont bel et bien en relation. En effet, pour développer la progression des apprentissages de la façon dont les élèves devraient comprendre un concept donné, on devrait tenir compte de la progression des apprentissages de la façon dont les élèves comprennent le concept en question. Ainsi, le deuxième type de progression (qui est hypothétique dans un premier temps) prend appui sur le premier type de progression (qui est généralement empirique). Dans cette section, nous considérons le deuxième type de progression, car il intéresse directement la didactique. Nous pensons qu'il aurait dû être nommé programmation des apprentissages plutôt que progression des apprentissages pour éviter toute confusion. Cependant, pour rester fidèle à la nomenclature actuelle, nous maintenons l'appellation progression des apprentissages.

La progression des apprentissages est un concept fondamental de la didactique car, elle cible un apprentissage signifiant et accessible. L'apprentissage est signifiant dans la mesure où il permet un usage pertinent des concepts pour résoudre des problèmes (Orange, 1997 rapporté de Meirieu, 1989 p. 10) : « Nous n'intégrons un élément nouveau que si celui-ci est, d'une manière ou d'une autre, une solution à notre problème ». Par ailleurs, il est accessible puisqu'il est décomposé en plusieurs niveaux d'apprentissage qui tiennent compte des niveaux cognitifs des élèves. Dans cette section, nous tentons d'explicitier ce propos aussi bien pour la progression des apprentissages d'un contenu que celle d'une activité, en l'occurrence la modélisation.

2.2.2.1. La progression des apprentissages d'un contenu

Pourquoi des vêtements étendus à l'air sèchent-ils ? Pourquoi arrive-t-on à sentir un parfum dans un endroit même s'il est versé dans un autre endroit (à proximité) ? Pourquoi l'eau se colore-t-elle lorsqu'on lui ajoute du colorant ?

Pour résoudre ces problèmes, l'élève devrait, premièrement, les relier à deux phénomènes : l'évaporation et la diffusion et deuxièmement, les relier et les expliquer à partir d'une même

idée qui consiste à concevoir que la matière est composée de particules en mouvement. En d'autres termes, l'élève devrait connaître des concepts et arriver à les relier entre eux. Les concepts et les liens entre eux constituent un réseau de concepts. Au fur et à mesure que l'élève développe son réseau, il acquiert une compréhension améliorée qui lui permet de résoudre des problèmes de plus en plus complexes (Krajcik, Drago, et Sutherland, 2012).

Malheureusement, les élèves ont souvent des connaissances fragmentées et des réseaux de connaissances présentant plusieurs lacunes (Stevens, Delgado, et Krajcik, 2010). Schmidt et Wang (2005) qualifient les structures de plusieurs programmes de formation américains de diffuses où les sujets sont entremêlés les uns aux autres. D'après eux, ces programmes sont caractérisés par un grand nombre de sujets traités de manière superficielle.

Pour remédier au problème de connaissances fragmentées des élèves, Krajcik, Drago, et Sutherland (2012) font l'hypothèse que ces derniers devraient développer une compréhension profonde d'un nombre restreint de concepts correspondant chacun à une grande idée. Cette compréhension profonde correspond à une structure bien organisée de concepts inter-reliés.

Les grandes idées

Les concepts n'ont pas tous la même importance. Certains sont fondamentaux, car ils peuvent expliquer plusieurs phénomènes à la fois. Ils ont donc avoir plusieurs ramifications dans le réseau de concepts. Ces concepts fondamentaux sont appelés les grandes idées : « Core or big ideas are powerful in that they are central to the discipline of science, provide explanations of phenomena, and are the building blocks for learning within a discipline. » (Krajcik, Drago, et Sutherland, 2012, p. 263).

Définition d'une progression des apprentissages

De manière consensuelle, la progression des apprentissages est définie par la description de l'apprentissage progressif des élèves par rapport aux grandes idées (Duschl et al., 2007).

Les composantes d'une progression des apprentissages

Une progression des apprentissages comporte essentiellement cinq composantes : 1- de grandes idées, 2- plusieurs niveaux d'apprentissage, 3- des évaluations psychométriques, 4- des enseignements appropriés, 5- deux bornes, (inférieure et supérieure) et des connexions avec d'autres grandes idées (Krajcik, Drago, et Sutherland, 2012).

Ainsi, pour une progression des apprentissages donnée, de **grandes idées** sont définies et **des niveaux d'apprentissage** sont identifiés pour rendre ces idées accessibles. À chaque niveau correspond plusieurs éléments : des prérequis, un contenu d'apprentissage à acquérir pour passer à un niveau supérieur, des raisonnements nécessaires à l'apprentissage du contenu en question, des conceptions et des difficultés que les élèves pourraient avoir et qui peuvent faire obstacle à l'apprentissage prévu. Chaque niveau supporte le suivant, ainsi l'ensemble des niveaux sont bâtis de manière cohérente. En outre, la progression des apprentissages comporte **des tests** proposés aux élèves pour valider de manière empirique les niveaux identifiés théoriquement. À chaque niveau correspond **des enseignements appropriés**.

Par exemple, une étude a montré que l'utilisation de multiples représentations des particules permet aux élèves de changer leurs conceptions relatives au modèle particulaire et de les faire évoluer (Adadan, Trundle, et Irving, 2010). Comme dernier élément, **les bornes** d'une progression des apprentissages qui permettent de délimiter les contenus relatifs aux grandes idées pour un ordre d'enseignement donné (primaire ou secondaire). Par exemple, à l'ordre secondaire, les changements de phases de la matière peuvent être expliqués à partir du modèle particulaire et en supposant l'existence de liaisons inter-particulaires. Il est inutile d'aborder, dans cet ordre d'enseignement, la nature de ces liaisons.

2.2.2.2. La progression des apprentissages d'une activité scientifique : la modélisation

Nous avons vu précédemment qu'une progression des apprentissages peut être développée pour un contenu dans le but de le rendre signifiant et accessible en identifiant des idées clés et en explicitant les liens entre les différents concepts du contenu scientifique en question. La

progression des apprentissages peut également être produite pour des activités puisque l'apprentissage implique également des activités scientifiques. Un exemple d'une telle progression est la progression des apprentissages de la modélisation (Schwartz et al., 2009).

Cette progression a été développée théoriquement, ensuite, elle a été expérimentée auprès des élèves du troisième cycle de l'ordre primaire et du premier cycle de l'ordre secondaire. Elle tient compte de deux relations, d'une part, la relation entre la réflexion et la communication d'une explication et, d'autre part, la relation entre la modélisation et la méta-modélisation.

La réflexion et la communication d'une explication

La relation entre la réflexion et la communication d'une explication s'explique par le fait que ces deux opérations (réflexion et communication d'une explication) ont un même but qui consiste à donner du sens à quelque chose. La réflexion permet de comprendre et de donner du sens à quelque chose pour soi-même et la communication d'une explication le permet pour d'autres. Ces deux opérations sont étroitement liées bien que l'une prime sur l'autre à un moment donné (Schwartz et al., 2009).

Modélisation et méta-modélisation

Pour des fins didactiques et en vue de rendre la dimension épistémologique de la modélisation explicite pour les apprenants, ces auteurs distinguent la modélisation de la méta-modélisation. La première est définie par la construction, l'utilisation, l'évaluation et la révision des modèles. La deuxième représente les conceptions épistémologiques des élèves associées aux modèles, par exemple, leur nature et leurs rôles (Schwartz et White, 2005). Il est intéressant de souligner que la compréhension de la nature et des rôles des modèles constitue un type de compréhension de la nature de la science (Lederman, 2007).

Bien que Schwartz et al. (2009) distinguent la modélisation de la méta-modélisation, ils postulent qu'elles sont étroitement liées par une double relation.

Modélisation Méta-modélisation

D'une part, la méta-modélisation permet de donner du sens à la modélisation (pourquoi modéliser) et permet d'orienter ses pratiques (comment modéliser). Par exemple, si les élèves conçoivent les modèles comme des entités perfectibles, ils pratiqueront la révision des modèles comme activité de modélisation pour améliorer leurs modèles. Inversement, les pratiques de modélisation rendent la méta-modélisation plus concrète et plus accessible en lui fournissant des contextes, par exemple, réviser un modèle est un bon moyen de comprendre que les modèles sont perfectibles.

Les deux aspects de la progression des apprentissages de la modélisation

La progression des apprentissages comprend deux aspects. Chacun inclut des éléments de modélisation et de méta-modélisation ainsi qu'une dimension qui se rapporte au sens i.e. à la réflexion et à la communication. Le premier aspect considère, d'une part, la construction et l'utilisation des modèles (éléments de modélisation) et, d'autre part, la compréhension du but des modèles en tant qu'outils pour expliquer, prédire et communiquer des explications (éléments de méta-modélisation). Le deuxième aspect concerne à la fois l'évaluation et la révision des modèles (éléments de modélisation) ainsi que la nature perfectible des modèles (élément de méta-modélisation). Ces deux aspects sont présentés dans les tableaux 6 et 7. Ils sont tirés de la publication de Schwartz et al. (2009). Nous les avons adaptés en les traduisant, en y intégrant des précisions présentes dans la publication de Fortus, Shwartz, et Rosenfeld (2016), en modifiant légèrement leur formulation pour plus de concision et en réorganisant certaines informations pour assurer une cohérence avec notre recherche. Signalons que les exemples considérés proviennent de l'étude de Schwartz et al. (2009).

Chaque aspect comporte plusieurs dimensions et trois ou quatre niveaux d'apprentissage. Les auteurs sont d'avis que le quatrième niveau correspond à celui des experts. On ne devrait donc pas s'attendre à ce que des élèves (encore moins des élèves des ordres primaire et secondaire)

l'acquièrent ou même l'atteignent. Cependant, il est intéressant d'en tenir compte puisqu'il représente le niveau ultime de la progression des apprentissages (PDA) de la modélisation.

2.2.2.3. Le premier aspect de la PDA de la modélisation : générer et utiliser un modèle

Cet aspect est caractérisé par six dimensions représentées par les lignes du tableau 6 et quatre niveaux comme nous l'avons déjà mentionné plus haut.

Au **premier niveau**, le modèle n'est pas considéré comme une entité abstraite, il est une copie du phénomène à l'étude (quatrième dimension). Générer ou utiliser un modèle (première et troisième dimensions) revient alors à illustrer les caractéristiques observables d'un phénomène. Par exemple, pour modéliser l'évaporation, les élèves de l'ordre primaire dessinent un récipient contenant de l'eau sous un Soleil en mentionnant avec une phrase (le récipient devient sec). Pour modéliser la condensation, les élèves dessinent une canette sur laquelle il y a des gouttelettes d'eau. Du point de vue de sa portée (deuxième dimension), un modèle est associé à un seul phénomène, il sert à l'illustrer (cinquième dimension) et non pas à l'expliquer. Comme il ne communique pas d'explication, le modèle ne semble pas avoir un aspect communicatif à ce niveau (sixième dimension). D'après l'expérimentation, la majorité des élèves de l'ordre primaire sont à ce niveau de modélisation (Schwartz et al., 2009).

Au **deuxième niveau**, les élèves génèrent des modèles en illustrant à la fois des éléments observables et d'autres qui ne le sont pas. Par exemple, pour expliquer l'évaporation, les élèves dessinent des flèches orientées vers le haut. Le degré d'abstraction du modèle commence à émerger (première dimension). Ainsi, le modèle ne sert plus seulement à illustrer un phénomène. Les élèves l'utilisent également pour expliquer de manière générale un phénomène (cinquième dimension) en établissant des associations entre lui et le phénomène (quatrième dimension). Cependant, les mécanismes de ces associations ne sont pas encore considérés. Par exemple, pour expliquer pourquoi on arrive à sentir un parfum dans un autre endroit (autre que celui où il a été versé), les élèves expliquent ce phénomène par le mouvement de l'odeur d'un point à un autre en associant le point de départ de l'odeur à

l'endroit où le parfum est versé et le point d'arrivée à l'endroit où il est senti. Le mécanisme du mouvement aléatoire des particules n'est pas décrit à ce niveau (troisième dimension). Comme le modèle sert à expliquer, c'est donc un moyen qui permet la transmission des idées, il possède alors une dimension communicative (sixième dimension). Finalement, la portée du modèle est plus grande qu'au premier niveau, car les élèves peuvent utiliser un même modèle pour plusieurs phénomènes. Cependant, la notion de gamme de phénomènes n'est pas encore vraiment considérée chez les élèves (deuxième dimension). L'expérimentation a montré que les élèves de l'ordre secondaire sont généralement du deuxième niveau et les élèves de l'ordre primaire peuvent atteindre des aspects de ce niveau avec du support et suite à un enseignement.

Au **troisième niveau**, le niveau d'abstraction du modèle augmente, les élèves génèrent des modèles en combinant des éléments de différents modèles (première et quatrième dimensions). Par exemple, pour expliquer la purification d'une « eau sale » au moyen de la distillation, les élèves peuvent générer un modèle qui combine les explications de l'évaporation et celles de la condensation. En combinant des éléments de différents modèles, les élèves peuvent générer un modèle ayant une meilleure portée, car il pourra être appliqué à plusieurs phénomènes liés (deuxième et cinquième dimensions). Le niveau d'explication lui aussi croît, les élèves peuvent expliquer des phénomènes au moyen de mécanismes et de processus et non pas juste à partir d'associations entre le modèle et le phénomène (troisième dimension). Ils sont également capables d'utiliser un modèle pour faire des prédictions. Par exemple, un élève est capable de prédire, s'il laissait son marqueur sans son couvercle pendant plusieurs jours, que ce marqueur n'écrirait plus, le solvant de son encre s'évaporerait. À ce niveau, le modèle a bien une dimension communicative plus élaborée qu'au deuxième niveau puisqu'il transmet des idées de mécanismes et de processus (sixième dimension).

Au **quatrième niveau**, en plus des éléments du troisième niveau, les modèles servent à prédire des phénomènes hypothétiques en considérant le comportement du monde selon différents modèles, en envisageant de nouvelles questions et, l'existence de nouveaux phénomènes

(hypothétiques). De plus, les modèles ne sont pas simplement des moyens pour communiquer des idées aux autres, mais ils aident et supportent la réflexion de leur concepteur.

Tableau 6 : Premier aspect de la progression des apprentissages de la modélisation; générer et utiliser un modèle (Schwartz et al., 2009)

Dimension	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
1- Générer un modèle : degré d'abstraction	Les élèves génèrent un modèle qui illustre les aspects observables d'un phénomène.	Les élèves génèrent un modèle qui montre ce qui est à la fois accessible et inaccessible aux sens.	Les élèves génèrent un modèle qui combine des éléments de différents modèles.	Un modèle peut être généré pour représenter des phénomènes hypothétiques.
2- Générer un modèle : portée	Les élèves génèrent un modèle qui s'applique à un seul phénomène.	Les élèves génèrent un modèle qui s'applique à plusieurs phénomènes sans pour autant que la notion de portée d'un modèle à une gamme de phénomènes soit explicite.	Les élèves génèrent un modèle qui s'applique à plusieurs phénomènes apparentés.	
3- Utiliser un modèle	Les élèves utilisent les modèles pour illustrer les aspects observables d'un phénomène.	Les élèves utilisent un modèle pour 1- expliquer de manière générale des aspects de phénomènes, 2- décrire des associations entre les éléments du modèle et le phénomène.	Les élèves utilisent les modèles pour expliquer des phénomènes apparentés : 1- décrire des mécanismes, 2- montrer des processus.	Les modèles sont utilisés pour prédire de nouveaux phénomènes.
4- La nature d'un modèle	Un modèle est une copie du phénomène.	Il y a des associations entre des éléments du modèle et le phénomène.	Un modèle peut être une combinaison des éléments de différents modèles.	Un modèle peut être une combinaison des éléments de différents modèles.

5- Le but d'un modèle	Le modèle sert à illustrer un phénomène.	Le modèle sert à illustrer et à expliquer un phénomène.	Le modèles sert à expliquer et à prédire différents aspects de phénomènes apparentés.	Le modèle sert à prédire des phénomènes hypothétiques.
6- La dimension communicative d'un modèle ⁵	Le modèle ne semble pas avoir pour but de faire comprendre. Il ne semble pas avoir une dimension communicative.	Un modèle permet de transmettre les idées du concepteur ou de l'utilisateur du modèle. Il permet à d'autres de comprendre.	Un modèle permet de communiquer à d'autres des idées du concepteur ou de l'utilisateur du modèle et des preuves de mécanismes et de processus.	Un modèle sert du concepteur ou de l'utilisateur du modèle de support à la réflexion.

⁵ Cette dimension englobe à la fois la réflexion et la communication. Bien qu'elles soient distinguées dans le texte, par mesure de concision qui est nécessaire dans un tableau, nous considérons que la réflexion est une forme de communication avec soi-même.

2.2.2.4. Le deuxième aspect de la PDA de la modélisation : évaluer et réviser un modèle

Cet aspect est caractérisé par trois dimensions représentées par les lignes du tableau 7 et quatre niveaux comme nous l'avons déjà mentionné plus haut.

Au **premier niveau**, les élèves conçoivent des modèles comme des copies de phénomènes. Ils sont soit vrais si ce sont des copies conformes ou faux dans le cas contraire. Les modèles ne sont pas considérés comme des entités perfectibles. Les élèves n'ont pas recours à des preuves pour les évaluer.

Au **deuxième niveau**, les modèles ne sont plus considérés comme des copies, ce sont des entités perfectibles. Les élèves ont recours à des preuves externes i.e. qui sont transmises soit par l'enseignant ou les manuels pour les évaluer. Les élèves révisent les modèles pour améliorer les explications qu'ils fournissent et pour que les associations entre les modèles et les phénomènes soient mieux décrites.

Au **troisième niveau**, les élèves peuvent avoir recours à des preuves empiriques pertinentes pour évaluer un modèle. Ce dernier est révisé, d'une part, pour que sa portée soit étendue i.e. pour améliorer la gamme de phénomènes qui lui correspond et, d'autre part, pour qu'il réponde au principe de parcimonie dans la description des mécanismes et des processus.

Au **quatrième niveau**, les modèles sont révisés pour qu'ils permettent de décrire, d'expliquer et de prédire des phénomènes hypothétiques

Tableau 7 : Deuxième aspect de la progression des apprentissages de la modélisation; évaluer et réviser un modèle (Schwartz et al., 2009)

Aspect	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Évaluer des modèles : rôle des preuves	Les élèves n'évaluent pas les modèles. Ils n'ont pas recours à des preuves.	Les élèves évaluent les modèles en considérant des preuves qui proviennent d'une autorité (manuel, enseignant) ou des preuves observées.	Les élèves évaluent les modèles en considérant toutes les preuves empiriques pertinentes.	
Réviser des modèles	Les élèves révisent les modèles en modifiant des préférences personnelles (comme un changement de couleur).	Les élèves révisent les modèles pour : 1- améliorer de manière générale leur pouvoir explicatif et prédictif 2- décrire des associations entre des éléments du modèle et un phénomène. 3- qu'ils soient applicables à différents phénomènes sans qu'un modèle soit explicitement associé à une gamme de phénomènes.	Les élèves révisent les modèles pour :1- qu'ils satisfassent au principe de parcimonie, 2- qu'ils représentent une gamme de phénomènes en décrivant des mécanismes et des processus.	Les modèles sont révisés pour qu'ils permettent de décrire, d'expliquer et de prédire des phénomènes hypothétiques.
Valeur d'un modèle	Les modèles sont vrais ou faux.	Les modèles sont perfectibles.	Les modèles sont perfectibles.	Les modèles sont perfectibles.

2.2.3. La modélisation en didactique des sciences

L'enseignement de la modélisation peut être envisagée de deux façons : soit que l'activité consiste à amener l'élève à **construire un modèle** soit qu'elle consiste à l'amener à **utiliser un modèle** déjà établi. Dans ce dernier cas, l'élève accepte le modèle qui lui est fourni et il se l'approprie. Pour éviter la confusion entre ces deux façons, (Gilbert et Justi, 2016, p. 59) utilisent des expressions différentes : l'expression « Modelling-based teaching » pour la construction des modèles et « Model-based teaching » pour l'utilisation des modèles.

Rappelons, comme nous l'avons vu précédemment avec le diagramme de Giere (figure 5), entre autres, que quelle que soit l'activité de modélisation (construction ou utilisation de modèle), il est important de distinguer le modèle de la réalité à l'étude. À ce propos, Robardet et Guillaud (1997) parlent du « respect du principe de différenciation modèle-réalité. »

Gilbert et Justi (2016) rapportent de Clement (1989) un diagramme pour soutenir l'apprentissage de la construction de modèles chez les élèves (figure 8). Ce diagramme a été développé à la suite d'une étude de cas où un scientifique a été invité à réfléchir à haute voix pour émettre des hypothèses et générer un modèle afin de résoudre un problème de recherche d'explication. Le diagramme représente le processus itératif permettant de construire un modèle. Il est constitué d'une production de modèle initial, de son évaluation rationnelle et empirique et de sa modification ou de son rejet. La production du modèle est un sous-processus qui implique l'observation et l'utilisation d'analogie en lien avec le modèle. Ces éléments reviennent globalement au processus OGEM (Williams et Clement, 2015). Nous présenterons, dans cette section, des concepts didactiques pour amener les élèves à générer, évaluer, modifier et utiliser un modèle.

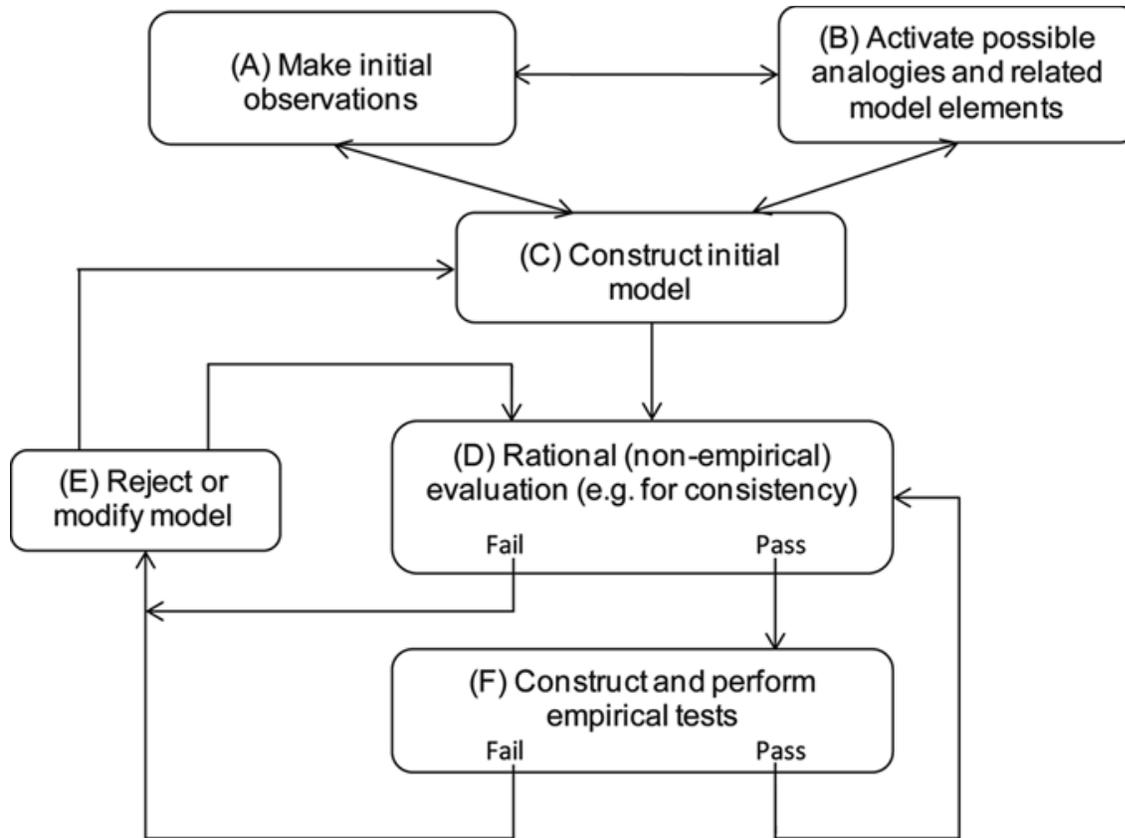


Figure 8 : Processus itératif de construction de modèle (Clement, 1989)

2.2.3.1. Générer un modèle

Pour générer un modèle, plusieurs aspects sont à considérer dont : 1- la réalité à modéliser, 2- le problème de type explicatif, 3- les analogies, les discussions.

La réalité à modéliser

Rappelons, tel que définit précédemment, qu'un modèle est une construction théorique en lien avec une réalité empirique. Ainsi, il est important de mettre en contact les élèves avec cette réalité ou les données qui en découlent pour qu'ils puissent générer un modèle (Hasni, 2010). Par exemple, pour amener les élèves à construire le modèle de la structure de la Terre, Hasni (2010) propose de leur fournir les données de l'évolution des vitesses sismiques des ondes P et S en fonction de la profondeur (Dercourt, Paquet, Thomas, & Langlois, 2006).

Un problème de type recherche d'explications et le choix judicieux de la question associée

Générer un modèle revient à générer une tentative d'explication à un phénomène. Pour amener les élèves à proposer des explications, il est nécessaire de leur soumettre des problèmes de type recherche d'explications (Orange, 2012). Ces problèmes sont généralement exprimés sous forme d'une question choisie de manière appropriée. Par exemple, pour faire travailler les élèves sur la nutrition, la question « *Comment est constitué le tube digestif ?* » n'implique pas une explication contrairement à la question :

« *Comment ce que j'ai mangé peut-il me donner des forces⁶ ?* » (Orange, 2012, p. 13).

Qu'est-ce qu'une explication ?

Bien qu'il n'ait pas de théorie unique associée à l'explication, les épistémologues s'entendent sur le fait qu'elle dépasse la description des observables d'un phénomène en considérant des aspects théoriques (Braaten et Windschitl, 2011). Ces derniers peuvent être des entités non observables comme les atomes, les molécules, les forces, l'énergie, etc. et des processus qui sont généralement des causes au phénomène à l'étude et qui rendent compte de la façon dont il se déroule (Braaten et Windschitl, 2011). Par exemple, pour expliquer l'état liquide, il ne suffit pas de le décrire en soulignant qu'il n'a pas de forme et qu'il a un volume défini. L'explication implique plusieurs aspects non observables : les particules, leur disposition serrée qui a pour conséquence un volume défini et leur mouvement où elles glissent les unes sur les autres de sorte qu'il n'y ait pas de forme.

Les analogies

Les entités et les processus non observables impliqués dans l'explication sont facilités par l'usage des analogies (Osborne et Patterson, 2011). Par exemple, dans le cas du modèle particulaire, pour expliquer pourquoi un solide a une forme et un volume définis, Fortman (1993) utilise l'analogie entre une unité militaire et les particules d'une substance à l'état solide. Ainsi, les distances entre les militaires d'une même unité sont petites, on suppose qu'il

⁶ Le mot devrait être énergie, mais comme ce dernier concept n'est pas connu des élèves de l'ordre primaire, il a été remplacé par le mot force (Orange, 2012).

en est ainsi entre les particules d'une substance à l'état solide; il n'y a pas de désordre dans une unité militaire et les mouvements ne sont pas aléatoires, il en est de même pour les particules d'une substance à l'état solide (figure 9).

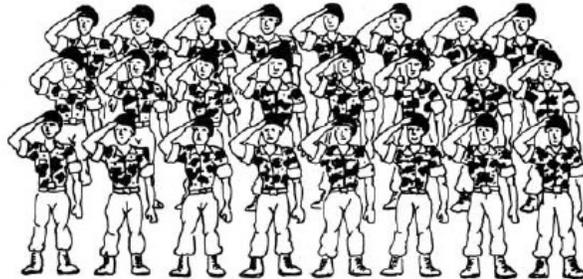


Figure 9 : Analogie entre les particules à l'état solide et une unité militaire

Cette exemple illustre l'utilité des analogies pour aider à représenter les concepts des échelles très petites (les particules). Cependant, elles sont également utiles aux concepts associés aux très grandes échelles comme l'âge de l'Univers et les processus astronomiques qui sont généralement représentés dans une échelle de 24 heures (Osborne et Patterson, 2011).

Ainsi, l'usage des analogies aide à soutenir la réflexion, à supporter la recherche d'explication pour générer des modèles. L'enseignant peut donc idéalement amener les élèves à faire des analogies, comme il peut les leur fournir.

Les discussions

Pour amener des élèves du primaire à postuler le premier énoncé du modèle particulaire, les élèves ont été engagés dans une discussion pour expliquer pourquoi la quantité d'eau placée dans des récipients diminuait de jour en jour. Il s'agit donc, pour les élèves, de fournir une explication du phénomène d'évaporation (Genzling, 1988). Il est important de souligner que cette explication n'est pas établie au préalable pour eux. Ils doivent la générer et la bâtir. Lors de ces discussions, les élèves sont arrivés à émettre l'hypothèse que l'eau est constituée de petits morceaux qui s'évaporent. Cette explication n'est évidemment pas celle d'un expert,

mais elle pourrait être considérée comme une solution au problème puisqu'elle permet bien de modéliser la disparition de l'eau des récipients.

Soulignons que cette étude est intéressante à considérer dans l'enseignement de la modélisation bien qu'elle implique des élèves du primaire. En effet, elle montre que les élèves à l'ordre secondaire sont parfaitement capables de construire des modèles à partir de discussions puisque des élèves plus jeunes (au primaire) le font.

2.2.3.2. Évaluer un modèle : l'argumentation

En général, pour proposer une explication à un phénomène, il n'y a pas un seul modèle qui est généré, il en existe plusieurs qui concourent. Les scientifiques doivent alors déterminer lequel des modèles est le plus satisfaisant. Cette opération exige le développement d'arguments (Driver, Newton, et Osborne, 2000).

En contexte de classe, en plus des stratégies de discussions, la planification des discours argumentatifs est une idée acceptée par la majorité des didacticiens aussi bien francophones qu'anglophones (Orange, 2012). Par exemple, pour résoudre des problèmes de types recherche d'explications, Orange (2012) propose dans un premier cours (de 70 min), de formuler la question du problème et de donner l'occasion aux élèves de proposer des explications de manière individuelle. Ensuite, les élèves se mettent en groupe de trois ou quatre élèves, chaque élève défend sa proposition et tente de réfuter celles de ses camarades. Par la suite, ils s'entendent sur une réponse qu'ils jugent la mieux fondée. Cette activité d'argumentation est effectuée une seconde fois en grand groupe. Finalement, les élèves sont amenés au moyen d'un guidage de la part de l'enseignant à choisir de manière consensuelle l'explication dont les arguments sont jugés les meilleurs.

L'argumentation est à la base de plusieurs apprentissages. Elle permet l'apprentissage conceptuel, le développement des compétences d'investigation en science, l'apprentissage

épistémologique de la science, la compréhension de la nature sociale de la science et la compréhension de la nature des arguments scientifiques (Driver et al., 2000).

Premièrement, l'apprentissage conceptuel est favorisé dans un discours argumentatif, car les arguments soutenus par un élève ou un groupe d'élèves peuvent être contestés par les pairs. Cette contestation est un bon moyen pour que l'enseignant puisse faire émerger les conflits cognitifs et, par suite, permette un changement conceptuel.

Deuxièmement, dans toute investigation scientifique, l'élève doit interpréter des données. Cette interprétation ne découle pas d'une simple déduction. Elle nécessite le déploiement d'un raisonnement, l'examen judicieux des preuves et la construction la plus satisfaisante possible d'arguments. Toutes ses étapes et tous ces apprentissages sont possibles au moyen d'une argumentation.

Troisièmement, en apprenant à examiner les preuves et les arguments et en se rendant compte qu'il peut exister plusieurs interprétations à un même phénomène puisque les données empiriques ne constituent pas directement des preuves, les élèves auront l'occasion de développer une meilleure conception épistémologique des sciences.

Quatrièmement, grâce à l'argumentation qui a lieu en classe en grand groupe, les élèves pourront apprécier l'aspect social de la science. Comme eux, les scientifiques examinent, discutent et valident des savoirs pour expliquer des phénomènes. Ces validations ne se font pas de manière instantanée, ce qui explique le progrès de la science dans le temps. Certaines questions du passé sont résolues pendant que d'autres questions contemporaines restent à l'étude, car les résultats ne font pas consensus et sont parfois contestés. Les élèves comprendront que la contestation en science n'est pas une faille, mais bel et bien une force. Driver et al. (2000) compare la contestation scientifique à un contrôle de qualité des théories scientifiques.

2.2.3.3. Utiliser un modèle : les activités à trois niveaux

Une fois un modèle construit, il peut être utilisé. L'utilisation d'un modèle peut impliquer plusieurs types d'activités dont trois sont indispensables. La première, guidée par un questionnement habile de l'enseignant, revient à **décrire la réalité empirique**. L'ensemble des descriptions de la réalité empirique constitue la **phénoménographie**. Celle-ci relève du champ empirique (Martinand et al., 1994). Par exemple, l'état liquide a un volume défini; il n'a pas de forme déterminée. Ces deux descriptions constituent la phénoménographie i.e. des relations empiriques (tel que présenté à la figure 7) de l'état liquide.

La deuxième activité est **l'explication de la réalité empirique au moyen du modèle** à utiliser. Cette représentation implique de nouvelles connaissances concernant la réalité empirique. Elle est alors appelée **phénoménologie** (Martinand et al., 1994). Pour poursuivre avec l'exemple de l'état liquide, la phénoménologie revient à dire : « on représente l'état liquide par des particules rapprochées faiblement liées entre elles qui peuvent glisser les unes sur les autres ». Il est important que l'enseignant distingue la phénoménographie de la phénoménologie pour une réalité donnée. En effet, il peut lui arriver d'utiliser le modèle de manière inconsciente et naturelle sans faire cette distinction, ce qui pourrait engendrer des obstacles didactiques chez l'élève.

La troisième activité est **la représentation de la réalité empirique au moyen d'un code symbolique ou iconique**. Ce code peut aider l'élève à comprendre le modèle, comme il peut être un moyen de communication que l'élève utilise pour expliquer la réalité empirique (Schwarz et al., 2009).

Ces trois types d'activité ne sont pas redondantes, elles se complètent et permettent d'intégrer des informations différentes, c'est ce que soutient Gabel (2005) au moyen de l'exemple de la combustion d'une bougie ci-dessous.

Exemple d'activité : la réaction de la combustion d'une bougie

Expérience : Décrire la réaction de combustion d'une bougie (la réaction peut faire l'objet d'un laboratoire ou d'une démonstration).

Modèle : Expliquer en termes de particules les observations émises.

Représentation : Écrire la réaction équilibrée de la combustion de la bougie.

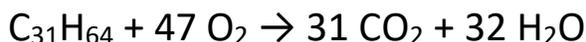
Observations : Une bougie est allumée avec une allumette, un bocal est placé sur la bougie allumée, la bougie brûle pendant quelques minutes et s'éteint. Au cours du processus, la cire se transforme en liquide, la mèche devient noire, mais sa pointe est rouge, le pot devient chaud, la bougie devient plus petite, et la flamme s'éteint. L'intérieur du pot est essuyé avec un morceau de papier bleu de chlorure de cobalt, il devient rose. De l'eau de chaux est versée dans le pot, elle devient trouble (traduction libre).

Explications de l'expérience : Pour qu'une combustion ait lieu, il faut qu'il y ait de l'oxygène. La cire se liquéfie dans la cuvette de la bougie à cause de la chaleur produite par la mèche, Elle (la cire) se transforme en vapeur, puis brûle en produisant de la lumière et de la chaleur. Ce processus continue jusqu'à ce que presque tout l'oxygène soit consommé. L'extrémité de la mèche est également brûlée, car elle produit de la lumière et de la chaleur. La mèche est noire, elle s'est probablement décomposée en carbone. Le papier de chlorure de cobalt bleu qui devient rose indique une présence d'eau. De même, du dioxyde de carbone doit être présent parce que l'eau de chaux devient trouble (traduction libre).

Explications du modèle : La chaleur de l'allumette provoque la fusion du solide (la cire), plus de chaleur provoque son passage à l'état vapeur. Dans cet état, les particules de paraffine occupent mille fois plus d'espace, elles rentrent en contact avec les molécules

de dioxygène de l'air, l'hydrogène de la cire réagit avec l'oxygène et produit la vapeur d'eau. De même, le carbone de la cire réagit avec l'oxygène et produit le gaz carbonique.

Explication à la représentation symbolique :



Jaber et Boujaoude (2012) l'ont fait pour des réactions chimiques avec des élèves de niveau équivalent à la quatrième année secondaire. Ces auteurs ont invité les élèves à décrire ce qu'ils observaient lorsqu'on ajoute de l'acide chlorhydrique à une solution de nitrate d'argent. Par la suite, les élèves devaient interpréter leurs observations en utilisant des symboles et des dessins faisant intervenir les particules.

En plus des trois activités décrites précédemment, l'enseignant peut proposer à l'élève d'autres activités. Par exemple, l'élève peut vérifier expérimentalement la portée du modèle i.e. qu'il vérifie expérimentalement le pouvoir explicatif et prédictif du modèle dans d'autres situations empiriques (autre que celle à l'étude). L'élève peut également vérifier les limites d'un modèle i.e. identifier une situation où le modèle ne fonctionne pas (Robardet et Guillaud, 1997).

2.2.4. La visualisation : un dispositif didactique utile à la modélisation

La modélisation implique souvent des concepts et des processus non observables qu'il est nécessaire d'imaginer. La visualisation permet de soutenir l'imagination exigée lors de la modélisation (Gilbert et Justi, 2016), et ce, aussi bien pour la conception de modèles que pour leur utilisation. Par ailleurs, selon les travaux de Piaget, chaque personne construit des représentations mentales pour penser et raisonner. Ces représentations mentales sont appelées des modèles mentaux. Il est plus facile de construire un modèle mental correspondant à un objet concret (parce qu'on l'a déjà vu dans le passé) plutôt qu'à un objet abstrait. Les particules qui composent la matière sont un bon exemple d'objets abstraits. Il

n'est pas toujours facile aux élèves de se les imaginer. L'étude de Kozma et Russell (1997) montre que les modèles mentaux des novices sont incomplets et imprécis comparés à ceux des experts. La visualisation aide les novices à développer des modèles mentaux semblables à ceux des experts (Williamson et Jose, 2009). En plus des objets abstraits, des expérimentations peuvent également être visualisées. Cette section présente des dispositifs de visualisations. Ils sont classés en deux catégories : ceux associés au registre empirique et ceux en lien avec le registre théorique.

2.2.4.1. Les dispositifs de visualisation du registre empirique

Les simulations d'expériences de laboratoire

Les simulations d'expérience de laboratoire qui s'effectuent au moyen d'un ordinateur sont une reproduction des caractéristiques essentielles et observables d'une vraie expérience. Les résultats des travaux sur les simulations d'expérience ne sont pas concluants. Il existe même des études dont les résultats sont contradictoires : une étude montre que les étudiants apprennent mieux dans les vraies expériences en manipulant concrètement le matériel avec les mains (Bourque et Carlson, 1987 cité par Williamson et Jose, 2009), alors qu'une autre étude arrive à un résultat presque contradictoire en montrant qu'une simulation d'expérience est une méthode d'enseignement très efficace (Jackman, Mollenberg et Bradson, 1987 cité par Williamson et Jose, 2009).

Personnellement, parce que nous avons utilisé les simulations d'expériences dans l'enseignement, nous pensons qu'elles présentent plusieurs avantages : elles aident à l'apprentissage par l'exercice et l'entraînement, l'élève peut refaire la simulation autant de fois qu'il le souhaite en peu de temps comparativement à une expérience de laboratoire. De plus, il n'y a pas de risque de briser le matériel, ce risque est assez élevé surtout avec des élèves du secondaire. Finalement, les coûts sont moindres, car les logiciels de simulation sont bien moins coûteux que les produits et le matériel utilisés dans les expériences de laboratoire. Évidemment, nous ne pensons pas que les simulations d'expérience peuvent remplacer les expériences de laboratoire, car l'élève doit apprendre à manipuler et à utiliser les instruments

de mesure (Carey S. , Evans, Honda, Jay, et Unger, 1989; Cariou, 2015), mais qu'elles pourraient être un moyen d'apprentissage complémentaire.

Les démonstrations

Lorsque la réalisation d'une expérience de laboratoire est soit trop simple (la fusion de la glace) ou trop longue (l'oxydation du fer), celle-ci peut être substituée par une démonstration. Les démonstrations sont donc des expériences de laboratoire présentées (à partir d'une réalisation en direct ou à partir d'un enregistrement) aux apprenants pour que ces derniers observent les changements qui ont lieu. Les démonstrations sont efficaces si, d'une part, les apprenants sont invités à faire des hypothèses et à émettre des explications sur les changements observés et si, d'autre part, les démonstrations sont évaluées lors des examens (Williamson et Jose, 2009).

Concernant l'efficacité des démonstrations, une recherche quasi-expérimentale (Deese et al., 2000) a été menée sur deux groupes d'étudiants, l'un des groupes (le groupe traitement) avait un examen de démonstration chaque deux semaines alors que l'autre groupe (le groupe contrôle) n'en avait pas et ne faisait qu'observer les démonstrations et écouter les explications. Les deux groupes ont subi un prétest et un posttest. Les résultats de l'étude ont montré que le prétest et le posttest du groupe contrôle étaient équivalents alors que les réponses du posttest du groupe traitement étaient meilleures que celles du prétest.

2.2.4.2. Les dispositifs de visualisation du registre théorique

Les modèles physiques de visualisation des particules

Les modèles physiques, comme les ensembles de boules et de tiges, sont concrets, les apprenants peuvent les toucher et les manipuler. Talley (1973) a montré que les étudiants qui observent leurs enseignants manipuler ces modèles puis qui les manipulent à leur tour pour construire des molécules ou pour montrer des interactions améliorent leur niveau cognitif et développent leur aptitude à la visualisation. Ceci est en accord avec les résultats de l'étude quantitative menée par Gabel et Sherwood (1980). Cette étude a montré que les étudiants qui

manipulent les modèles physiques performant de manière significativement meilleure dans la résolution des problèmes de chimie générale.

Les modèles virtuels de visualisation des particules

Wu, Krajcik et Soloway (2001) ont étudié l'apport de l'utilisation des logiciels de visualisation à l'apprentissage des représentations en chimie. Ces auteurs ont réalisé leur étude au moyen du logiciel *eChem* qui permet la construction et la visualisation des modèles moléculaires aussi bien dans deux dimensions (2D) que dans trois dimensions (3D). Les résultats ont montré que l'utilisation de tels logiciels peut aider les étudiants à générer des modèles mentaux appropriés.

Les images pour visualiser les comportements des particules

Noh et Scharmann (1997) ont étudié l'utilisation des images dans l'enseignement. Pour ce faire, les auteurs ont mené une étude en considérant deux groupes d'élèves du niveau cinquième secondaire. L'un des groupes est le groupe contrôle dont l'enseignement ne présente pas d'images et l'autre groupe est le groupe traitement pour lequel 31 images ont été intégrées dans l'enseignement. Les concepts ciblés sont : la nature particulière de la matière, les états de la matière, les changements de phases, la diffusion et la dissolution. Les étudiants du groupe traitement ont mieux réussi le test administré après l'enseignement. L'analyse des résultats du test a montré que l'enseignement au moyen des images aide les étudiants à avoir des conceptions acceptables du point de vue scientifique. Haslam et Hamilton (2010) ont également étudié l'effet de l'utilisation des illustrations dans l'enseignement. L'étude a montré que l'intégration des illustrations entraîne plusieurs avantages : une meilleure performance de la part des élèves, une réduction du temps nécessaire à la réalisation de la tâche, une réduction de la charge cognitive des élèves lors de la réalisation de la tâche et une réduction de la difficulté de la tâche.

L'efficacité des images est basée sur la théorie de la dualité du codage de Paivio (1986) (« *Paivio's dual coding theory* »). Selon cette théorie, une information active un processus

verbal ou un processus visuel dans la mémoire de travail de l'apprenant. Le processus activé est verbal si l'information est en mots, il est visuel si l'information est en images; par exemple, le mot « sucre » active un processus verbal dans la mémoire de travail de l'apprenant et une image « d'un cube de sucre » active un processus visuel. Ces deux types de processus entraînent deux types de codage dans la mémoire à long terme : un codage verbal et un codage visuel (d'où la dualité de codage). La théorie de la dualité du codage postule que le codage verbal et visuel sont indépendants et additifs. De plus, on se rappelle deux fois plus des images que des mots. En effet, on suppose qu'on associe spontanément des étiquettes de mots aux images (donc les images seront doublement codées) alors qu'on n'associe pas forcément des images à des mots surtout si ces derniers sont abstraits.

Les animations et les multimédia pour visualiser les comportements des particules

Plusieurs définitions sont associées au mot animation. D'après le dictionnaire en ligne de Merriam (www.merriam-webster.com), une animation est un mouvement d'images obtenues à partir d'une série de dessins, de graphiques d'ordinateurs, ou de photographies d'objets inanimés. Selon Britannica en ligne (www.britannica.com), une animation est la construction, cadre par cadre, d'images en mouvement à partir d'une chorégraphie impliquant à la fois le mouvement et le son.

Comme une animation contient une série d'images, son efficacité est également basée sur la théorie de la dualité du codage de Paivio (1986). En effet, Paivio (1986) précise que le codage visuel n'est pas engendré seulement par des images statiques, mais il l'est également par les processus dynamiques.

En plus de la dualité du codage, la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia de Mayer (2001) (« Mayer's cognitive theory of multimedia learning ») montre les avantages des animations et des multimédias dans l'apprentissage. Cette théorie postule que le système de traitement de l'information des humains inclut deux types de canal : l'oreille, qui est stimulée par le son des mots et l'œil qui est stimulé par les images et les mots écrits (d'où la dualité de canal). Ces deux canaux sélectionnent les images et les mots, les enregistrent et les

transmettent à la mémoire de travail. Il est important de signaler que chaque canal a une capacité limitée. Une fois que les images et les mots sont dans la mémoire de travail, celle-ci les organise et active le processus verbal et le processus visuel comme nous l'avons vu précédemment. L'apprenant construit à partir de ces deux processus des représentations verbales et visuelles qu'il enregistre dans la mémoire à long terme en les connectant à des connaissances antérieures.

Le modèle de Tasker (2005), basé sur cette théorie, postule que l'information est captée par les organes des sens. Elle est ensuite acheminée vers la mémoire de travail qui est à court terme. L'information est soit perdue (si la capacité de la mémoire de travail est atteinte ou si l'information est complexe) soit transférée à la mémoire à long terme après avoir été traitée. Une fois dans la mémoire à long terme, l'information sera soit reliée à un réseau de concepts ou enregistrée de manière isolée.

Par ailleurs, Sanger (2009) rapporte sept corollaires : 1- le principe multimédia (« the multimedia principle ») : les élèves apprennent mieux à partir de mots et d'images qu'à partir de mots seulement; ce principe est en accord avec la théorie du double codage de Paivio (1986). 2- Le principe de la contiguïté spatiale (« the spacial contiguity principle ») : les apprenants apprennent mieux lorsque les mots et les images sont proches les uns des autres plutôt qu'éloignés. 3- Le principe de la contiguïté temporelle (« *the temporal* contiguity principle ») : les apprenants apprennent mieux lorsque les mots et les images sont présentés simultanément plutôt que successivement. 4- Le principe de cohérence (« coherence principle ») : les apprenants apprennent mieux lorsque des informations superflues sont exclues de l'animation. 5- Le principe de modalité (« the modality principle ») : les apprenants apprennent mieux de l'animation et de la narration que de l'animation et du texte. 6- Le principe de la redondance (« the redundancy principle ») : les apprenants apprennent mieux de l'animation et de la narration que de l'animation, de la narration et du texte. La répétition des mots dans le système auditif et visuel n'est pas efficace, de plus, le canal visuel risque d'être surchargé par les images et le texte. 7- Le principe individuel des différences

(« individual differences principle ») : si la concentration des savoirs dans l'animation est faible et la concentration des étudiants est grande, les effets de l'animation sont plus importants que si la concentration des savoirs dans l'animation est grande et la concentration des apprenants est faible.

L'efficacité de l'animation dans l'apprentissage a été validée par plusieurs travaux. Parmi ces travaux, on peut mentionner l'étude pionnière de Williamson et Abraham (1995). Ces auteurs ont attribué les difficultés d'apprentissage de la nature particulière de la matière et des comportements des particules à l'inaptitude des étudiants à se créer des modèles mentaux. Ils ont alors supposé que l'animation aiderait les étudiants à générer des images mentales et, en conséquence, à mieux comprendre les phénomènes qui ont lieu à l'échelle submicroscopique. Pour vérifier leur hypothèse, ils ont considéré trois groupes d'étudiants inscrits au premier semestre de chimie générale : un groupe témoin dont les cours ont été traditionnels (sans présentation d'animation), un deuxième groupe pour lequel des animations ont été intégrées dans deux cours et un troisième groupe qui a observé les animations dans les deux cours en question et dans des séances de discussions. Les animations duraient moins de trois minutes. Huit ont été intégrées dans le cours sur les propriétés des gaz, des liquides et des solides et cinq animations, dans le cours sur les réactions chimiques. Une fois les cours terminés, les trois groupes d'étudiants ont répondu au test PNMET (« *particulate nature of matter evaluation test* ») qui mesure l'apprentissage conceptuel. Les résultats ont montré que l'apprentissage conceptuel des étudiants qui ont observé les animations était supérieur de manière significative à celui des étudiants qui n'ont pas vu les animations. Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que les animations fournissent des modèles visuels scientifiquement corrects des processus qui ont lieu dans l'échelle submicroscopique, ces modèles réduisent les conceptions non scientifiques et favorisent la compréhension de la nature particulière de la matière.

Yeziarski et Birk (2006) ont également exploré, à partir d'une étude quasi-expérimentale, le rôle des animations dans l'apprentissage de la nature particulière de la matière. Ces auteurs

ont considéré deux groupes, un groupe traitement qui a visualisé quatre animations des particules d'eau (dans l'état liquide, dans l'état solide, dans l'état vapeur et lors de la fusion) et un groupe contrôle qui n'a pas vu les animations. Les résultats du prétest et du posttest (le test est appelé ParNoMat pour « *particulate nature of matter* ») des deux groupes ont montré une meilleure performance du groupe traitement dans le posttest. De plus, la différence observée au prétest entre les filles et les garçons, qui est due aux meilleures aptitudes de visualisation des garçons, a disparu. Les auteurs recommandent alors l'utilisation fréquente des animations pour visualiser le comportement des particules. Les animations devraient être accompagnées de discussions d'élèves qui interprètent leurs observations.

Les dessins et les animations générées par les apprenants.

Il est difficile de connaître les modèles que les élèves construisent mentalement. Un bon moyen pour les déterminer et les évaluer est de demander à ces élèves de générer des dessins ou des animations de ce qu'ils comprennent. Précisons que le mot animation, dans ce contexte, signifie un ensemble de dessins. Cette définition est empruntée à Williamson et Jose (2009). Un ensemble de dessins décrit mieux les processus dynamiques comme une transformation physique ou une réaction chimique.

Zhang et Linn (2011) ont exploré, à travers un projet sur la combustion de l'hydrogène, l'impact des dessins générés par des élèves de niveau scolaire troisième secondaire. Ces auteurs ont mené une étude auprès de deux groupes d'élèves A et B. Au début du projet, les deux groupes ont répondu à un prétest. Leurs résultats étaient semblables. Dans cette étude, le traitement consistait à montrer aux élèves (des deux groupes) une animation sur la combustion de l'hydrogène. Cette animation comportait des questions. Après la visualisation de l'animation, les élèves du groupe A ont répondu aux questions qui figuraient dans l'animation. Ils ont également généré à quatre reprises (avant la visualisation, deux fois pendant la visualisation et après la visualisation) quatre à cinq dessins pour représenter la réaction. On leur a demandé de faire les dessins en considérant six molécules de dihydrogène et trois molécules de dioxygène. Ainsi les élèves ne pouvaient pas simplement reproduire les images de l'animation

puisque celles-ci comportaient des centaines de molécules. Ils devaient plutôt interpréter l'animation, l'intégrer et faire un transfert d'apprentissage (faire des représentations en respectant un nombre donné de molécules qui est différent de ce qu'ils avaient observé dans l'animation). De plus, ils devaient expliquer leurs dessins pour fournir le maximum d'idées qu'ils avaient. Les élèves du groupe B ont également répondu aux questions de l'animation. Cependant, ils n'ont pas généré de dessins. À la place, ils ont passé plus de temps à revoir l'animation. On leur a également demandé (comme pour les élèves du groupe A) d'expliquer le changement des liaisons chimiques et des molécules lors de la réaction. À la fin du projet, les élèves des deux groupes ont passé un post-test qui comportait cinq questions, deux questions où les élèves devaient reconnaître parmi plusieurs représentations les représentations moléculaires correspondant aux réactifs et au produit de la réaction et trois questions où les élèves devaient générer des dessins pour expliquer comment la réaction se produit. Les résultats du post-test ont montré que les élèves du groupe A avaient plus d'idées que les élèves du groupe B sur les réactions chimiques. De plus, leurs idées étaient plus précises et permettaient de fournir des explications plus correctes. Les auteurs recommandent de demander aux élèves de générer des dessins, car ces derniers les aident à mieux interpréter les processus et à intégrer plus d'informations

2.2.5. La démarche didactique : un soutien à l'apprentissage

Selon le constructivisme psychologique, basé sur les travaux de Piaget (Astolfi et al., 2008; Thouin, 2019), les connaissances ne viennent pas telles quelles de l'extérieur, elles sont construites. Par conséquent, selon le constructivisme didactique, l'enseignement ne devrait pas se faire par une simple transmission du savoir. Il devrait faire en sorte de faciliter la construction de connaissances par l'élève. Un tel enseignement peut être caractérisé par une démarche didactique constituée d'une séquence d'activités et d'éléments nécessaires au déroulement de ces activités. Les activités en question sont souvent des activités fonctionnelles, des activités de résolution de problème, des activités de structuration, des activités d'enrichissement et des activités d'évaluation (Thouin, 2019).

2.2.6. Une séquence de situations de modélisation mathématique

Bien que nous nous intéressons, dans le cadre de cette étude, à la construction et à l'utilisation des modèles de nature qualitatives, il est intéressant de mentionner qu'une étude pionnière a été réalisée au Québec pour construire une séquence de huit situations de modélisation mathématique associée à l'enseignement des gaz parfaits. Cette séquence a été expérimentée auprès d'élèves du niveau cinquième année secondaire (Gauthier, 1998). Les résultats ont montré que plusieurs situations sont efficaces. En effet, ces situations ont permis, d'une part, une évolution des conceptions non scientifiques des élèves et une évolution des connaissances mathématiques associées aux fonctions affines et à la proportionnalité et, d'autre part, elles ont permis aux élèves de pratiquer la modélisation.

2.2.7. Une récapitulation des concepts fondamentaux

Compte tenu de l'importance des concepts précédents, il est intéressant de les résumer (tableau 8).

Tableau 8 : Récapitulation des concepts fondamentaux

Section	Les points importants de la section
La modélisation et les modèles scientifiques	1- Le savoir est le résultat d'une construction intellectuelle. 2- Un savoir scientifique est une réponse à un problème ou à une question. 3- Le processus de modélisation revient à : observer une réalité, générer un modèle , produire des données empiriques à partir de l'observation ou de l'expérimentation, produire des données théoriques à partir du modèle généré, comparer les données empiriques aux données théoriques, évaluer le modèle généré , l'accepter ou le modifier. 4- la nature d'un modèle : c'est un construit et il est perfectible. 5- Les objectifs d'un modèle : représenter, expliquer et prédire une réalité. 6- Différentes relations : la relation entre le modèle et la théorie, la relation entre le modèle et la réalité à l'étude.
La PDA de la modélisation	La PDA de la modélisation implique deux aspects. Le premier est en lien avec la construction et l'utilisation d'un modèle . Cet aspect implique le rôle explicatif et prédictif d'un modèle ainsi que sa nature de construit . Le

	deuxième aspect est en lien avec l'évaluation et la révision d'un modèle . Il implique la nature perfectible d'un modèle .
La modélisation en didactique des sciences	1- L'enseignement de la modélisation revient à l'enseignement de la construction et de l'utilisation d'un modèle . 2- Enseigner la construction d'un modèle revient à : - poser une question aux élèves qui exige une explication , amener les élèves à faire des analogies pour expliquer, - engager les élèves dans des discussions pour les amener à émettre des explications et des hypothèses, - planifier des discours argumentatifs pour amener les élèves à évaluer des explications. 3- Enseigner l'utilisation d'un modèle revient à proposer aux élèves des activités à trois niveaux : - décrire une réalité (phénoménographie) , - représenter une réalité au moyen des éléments du modèle , - expliquer la réalité à l'aide du modèle (phénoménologie) . 4- Distinguer la réalité à l'étude du modèle : le principe de différenciation .
La visualisation : un dispositif didactique utile à la modélisation	1- La visualisation est utile à la modélisation , car elle permet de : 1- soutenir l'imagination nécessaire à la construction d'un modèle, 2- comprendre les modèles déjà établis en concevant de manière acceptables les objets abstraits qui les constituent souvent (les particules, leur mouvement, leurs interactions, etc.), i.e. faire évaluer les conceptions des élèves vers les conceptions scientifiques , 3- comprendre la relation entre le modèle et la réalité qu'il explique. 2- Il y a plusieurs dispositifs de visualisation.
La démarche didactique : un soutien à l'apprentissage	1- La démarche didactique soutient l'apprentissage puisqu'une simple transmission des connaissances ne suffit pas pour apprendre. En effet, la démarche didactique tient compte à la fois du processus d'apprentissage que des objets d'apprentissage acquis à partir de ce processus. 2- Elle comporte plusieurs types d'activités : des activités fonctionnelles, des activités de résolution de problèmes, des activités de structuration, des activités d'enrichissement et des activités d'évaluation.

2.2.8. Le cas du modèle particulaire

Le modèle particulaire est un modèle scientifique qui postule que la matière est composée de particules. Ce modèle comporte plusieurs énoncés relatifs aux particules. Cette section présente des progressions des apprentissages du modèle particulaire, ses énoncés et des réalités qui lui sont associées.

2.2.8.1. Des progressions des apprentissages du modèle particulaire

Plusieurs progressions du modèle particulaire ont été développées. Smith, Wisser, Anderson, et Krajcik (2006) en ont produit une en se basant sur plusieurs études empiriques concernant la compréhension des élèves par rapport au modèle particulaire. Cette progression (présentée dans l'annexe 1) considère les six grandes idées suivantes :

1- les propriétés macroscopiques : les objets sont constitués de matière. Ils peuvent être décrits, classifiés en fonctions de leurs propriétés. Celles-ci peuvent être mesurées.

2- le modèle particulaire : toute la matière est composée d'un nombre limité d'atomes différents (un peu plus de cent ont été identifiés) qui sont généralement liés dans les molécules et les réseaux. Chaque atome occupe un espace, a une masse, et est en mouvement constant. Les propriétés macroscopiques de la matière dépendent de la nature, de l'agencement et du mouvement des atomes et des molécules dont elle est composée.

3- la conservation et la transformation de la matière : la matière peut être transformée par des processus physiques et chimiques, mais elle n'est pas créée ou détruite.

4- l'explication de la conservation et de la transformation de la matière : la matière est conservée lors des changements physiques et chimiques, car les atomes ne sont ni détruits ni produits. Lors des changements chimiques, de nouvelles substances sont formées par un réarrangement d'atomes. Alors que lors des changements physiques, les particules changent d'arrangement et de mouvement, elles restent intactes de sorte que la substance conserve sa nature.

5- l'épistémologie : nous pouvons connaître le monde grâce à la mesure, la modélisation et l'argumentation.

6- les propriétés des particules : il faut distinguer les propriétés des particules de celles des propriétés macroscopiques de la matière.

Johnston et Tymms (2011) ont également développé une progression des apprentissages (annexe 2) du modèle particulaire en se basant sur une étude antérieure (Johnson, 1998) qui a permis d'analyser les réponses de plus de 400 élèves de 11 à 14 ans sur le concept de substance. Cette progression considère quatre grandes idées : 1- les propriétés et les substances; 2- les mélanges; 3- le changement chimique; 4- le modèle de particules et les explications; et 5- les changements de masse. Elle compte 52 éléments et, ne présente pas de progression claire (Morell, Collier, Black, et Wilson, 2017).

Dans une autre étude, Johnson (2013) a proposé une nouvelle progression des apprentissages (annexe 3) en se concentrant seulement sur la quatrième idée i.e. le modèle de particules et les explications. Cette progression comporte 18 éléments et trois lignes de progression : 1- le concept de particules, 2- les mouvements des particules dans les trois états de la matière et les changements d'états, 3- les structures moléculaires compte tenu de la composition atomique.

2.2.8.2. Les énoncés du modèle particulaire

Plusieurs travaux (Griffiths et Preston, 1992; Novick et Nussbaum, 1981; etc.) font très souvent allusion à des idées dites acceptables du point de vue scientifique. Cependant, ils ne les présentent pas. En s'appuyant sur les conceptions des apprenants et les idées acceptables scientifiquement, de Vos et Verdonk (1996) ont transposé le contenu scientifique de la nature particulaire de la matière à l'enseignement de la science. La transposition en question a pour but de simplifier le contenu scientifique de la nature particulaire de la matière pour qu'il soit accessible aux élèves du secondaire tout en maintenant sa pertinence. Ce but n'était pas facile à atteindre, car la nature particulaire de la matière est un sujet complexe et abstrait des sciences modernes; donc difficile à enseigner, quelques compromis ont alors été nécessaires.

La transposition a finalement conduit au modèle particulaire constitué des huit énoncés suivants :

1- Toute la matière est constituée d'entités appelées particules. Les particules individuelles sont trop petites pour être vues. Elles se comportent comme des objets immuables durs et solides sauf lors des réactions chimiques. Il n'est pas pertinent de parler des dimensions et des formes des particules. Dans les dessins, les particules peuvent être représentées par des petits cercles ou des points.

2- Les particules sont en perpétuel mouvement en raison de l'élasticité parfaite des collisions. Il existe une relation directe entre la température d'une quantité de la matière et l'énergie cinétique moyenne de ses particules.

3- L'espace vide entre les particules d'un gaz est beaucoup plus important que celui occupée par les particules elles-mêmes. Dans un contenant fermé, les particules d'un gaz sont réparties uniformément, ce qui implique que la gravité a un effet négligeable sur elles.

4- Il existe une attraction mutuelle entre deux particules, mais sa force diminue rapidement avec la distance. Dans un gaz, l'attraction entre les particules est négligeable, sauf à haute pression et à basse température, lorsqu'il risque de se condenser.

5- Dans les liquides et les solides, les particules sont beaucoup plus rapprochées et soumises à une attraction mutuelle. Dans les solides, les particules sont disposées de manière régulière, chaque particule peut seulement vibrer autour d'une position fixe. Dans les liquides, les particules sont disposées de manière irrégulière et se déplacent d'un endroit à l'autre.

6- Chaque substance pure possède son propre type de particules. Deux substances pures différentes ont deux types de particules différentes. Un mélange contient plus d'un type de particules.

7- Dans une réaction chimique, les particules se comportent d'une façon qui montre qu'elles se composent d'une ou de plusieurs sous-entités appelées atomes. Ces derniers sont conservés dans une réaction. Une réaction est donc un réarrangement d'atomes. Chacun des éléments chimiques (environ 100) a son propre type d'atomes.

8- Un atome est constitué d'un noyau chargé positivement. Ce dernier est entouré par un certain nombre d'électrons chargés négativement. Les particules chargées obéissent à la loi de

Coulomb. La formation de liaisons chimiques ainsi que des courants électriques sont décrits en termes de mobilité des électrons.

Dans l'énoncé 1, Vos et Verdonk (1992) ont souligné un compromis entre le contenu scientifique et le contenu à enseigner, ce compromis est le fait de comparer le comportement des particules à des objets immuables durs et solides sauf lors des réactions chimiques. Ces auteurs ont justifié l'usage de cette comparaison parce qu'elle est acceptable; certes, elle ne représente pas un point de vue scientifique, mais elle ne le compromet pas non plus : comparer le comportement des particules à celui d'objets immuables durs et solides ne signifie pas que les particules sont des objets immuables, durs et solides (conception alternative). En plus de ne pas compromettre le contenu scientifique, cette comparaison a l'avantage de pouvoir être assimilée par des élèves du secondaire. Vos et Verdonk (1992) ont évoqué d'autres exemples de compromis dont celui de Griffiths et Preston (1992) selon lequel on demande aux élèves de dessiner ce qu'ils verraient s'ils pouvaient regarder un gaz avec un instrument de mesure sophistiqué. Bien que du point de vue scientifique, on ne peut pas voir des particules et un tel instrument de mesure n'existe pas, cette pratique est acceptable en didactique, car elle permet d'avoir accès aux conceptions des élèves

2.2.8.3. Les propriétés, l'organisation et les transformations de la matière

L'apprentissage du modèle particulaire est nécessaire pour expliquer plusieurs aspects de la matière. Par exemple, **le cinquième énoncé** permet à l'élève de comprendre pourquoi un solide a une forme (ses particules sont agencées de manière régulière et vibrent autour d'une position d'équilibre), alors que le liquide n'a pas de forme (ses particules sont agencées de manière irrégulière et se déplacent d'un endroit à l'autre). Ce même énoncé peut expliquer pourquoi les solides et les liquides ont un volume et, sont incompressibles (leurs particules sont rapprochées et soumises à une attraction mutuelle). Au contraire, d'après **le troisième énoncé**, un gaz n'a ni forme, ni volume car, la force d'attraction entre ses particules est négligeable, donc, celles-ci se déplacent librement. De plus, comme l'espace vide entre les particules d'un gaz est important (troisième énoncé), un gaz est compressible. **Le deuxième** et

Le quatrième énoncé permettent d'expliquer les changements d'état. Par exemple, une vaporisation (passage de l'état liquide à l'état gazeux) correspond à une rupture de liaisons inter-particules. Cette rupture peut être expliquée par l'éloignement des particules dû à l'augmentation de leur mouvement, lequel est dû à une augmentation de température. Au contraire, lors d'une solidification (passage de l'état liquide à l'état solide), la diminution de la température fait en sorte que le mouvement des particules diminue, ce qui entraîne un renforcement des forces d'attraction entre les particules, ce qui se traduit à l'échelle de la substance par un état solide.

Le sixième énoncé permet d'expliquer l'organisation de la matière. Dans cette étude, on entend par l'organisation de la matière les substances suivantes : les mélanges, les substances pures, les mélanges hétérogènes, les mélanges homogènes, les solutions, les composés et les éléments. Le sixième énoncé définit ce qu'est un mélange et une substance pure à l'aide du type des particules. Ainsi, une substance qui contient plus d'un type de particules est un mélange, sinon (s'il y a un seul type de particule), il s'agit d'une substance pure. Dans le cas d'un mélange, celui-ci est hétérogène si la distribution de ses particules n'est pas uniforme et homogène dans le cas contraire. Dans le cas d'un mélange homogène, si une substance A est en grande quantité par rapport à une autre B alors la substance A est dite solvant et la substance B est dite soluté. L'ensemble, solvant et soluté, est dit solution.

Pour expliquer les transformations chimiques, il est nécessaire de considérer que les particules sont composées d'atomes i.e. **septième énoncé** du modèle particulaire.

À partir d'expérimentations, des modèles atomiques ont été construits et améliorés au fil du temps pour représenter la structure d'un atome d'où le **huitième énoncé** du modèle particulaire. Parmi ces modèles, le modèle de Rutherford, le modèle de Rutherford-Bohr et le modèle atomique simplifié.

2.2.8.4. La dualité entre les réalités et le modèle particulaire

Les énoncés du modèle particulaire font, d'une part, référence à des réalités et, d'autre part, aux propriétés des particules associées à ces réalités (tableau 9). Ainsi, les cinq premiers énoncés font, d'un côté, référence aux trois états de la matière et, d'un autre côté, aux propriétés des particules dans ces trois états : leur mouvement, lequel dépend de la température; leur arrangement; la force entre deux particules qui dépend de la distance qui les sépare. Le sixième énoncé fait référence à la nature d'une substance, laquelle peut être une substance pure ou un mélange et au type de particules (un seul type de particules compose une substance pure et plus d'un type de particules constitue un mélange). Le septième énoncé est à propos des réactions chimiques et de la composition des particules en sous-entités appelées atomes. Le huitième énoncé concerne les courants électriques, la loi de Coulomb et la composition d'un atome i.e. un noyau chargé positivement et des électrons autour chargés négativement.

Ainsi, il est important de distinguer la réalité, d'une part, du modèle particulaire, d'autre part. En d'autres termes, il est essentiel de différencier les propriétés macroscopiques (forme, volume, température, etc.) des propriétés des particules (tableau 9). C'est le principe de différenciation entre la réalité à l'étude et le modèle (Robardet et Guillaud, 1997). Ce principe permet de distinguer la phénoménographie qui est l'ensemble des descriptions de la réalité de la phénoménologie qui est la représentation de la réalité au moyen du modèle (Martinand et al., 1994).

Tableau 9 : Dualité entre les réalités et les propriétés des particules

Les réalités	Les énoncés du modèle particulaire	Les propriétés des particules
Les trois états de la matière	Les cinq premiers énoncés	Le mouvement; l'arrangement; le mouvement dépend de la température; la force entre les particules (force inter-particules) dépend de la distance entre celles-ci.
Les substances pure et les mélanges	Le sixième énoncé	Le type de particules.
Les changements chimiques	Le septième énoncé	La composition des particules; les liaisons chimiques (force intra-particules).
Le courant électrique, la loi de Coulomb	Le huitième énoncé	La composition des atomes.

2.3. Synthèse et questions de recherche

En guise de synthèse, plusieurs travaux de recherche ont été effectués pour améliorer l'enseignement de la modélisation (tableau 8). Cependant, ce dernier continue à présenter plusieurs lacunes. Par exemple, les enseignants pensent que la construction des modèles dépasse les aptitudes de leurs élèves (Van Driel & Verloop, 2002). Ainsi, une majorité d'enseignants ne privilégient pas les activités de construction de modèles par les élèves. De plus, le processus de modélisation, la nature des modèles et la métamodélisation ne sont pas expliqués aux élèves de manière explicite (Gray & Rogan-Klyve, 2018). Au Québec, l'enseignement de la modélisation peut également être amélioré (Roy & Hasni, 2014; Aurousseau, 2017).

Pour relever les lacunes dans l'enseignement de la modélisation, la majorité des études ont été effectuées auprès des enseignants (tableau 5). À notre connaissance, il n'y a pas d'étude qui a été réalisée au Québec pour analyser l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ. Il est donc intéressant d'effectuer une telle analyse surtout que tout enseignement est tenu de respecter le PFEQ d'après la loi de l'instruction publique.

Pour mettre en œuvre notre analyse, il est indispensable de considérer un modèle spécifique. Comme nous l'avons montré précédemment, le cas du modèle particulière a été retenu. Cette mise en œuvre nous permettra d'examiner explicitement le contenu du modèle particulière à enseigner et la manière avec laquelle ce contenu est organisé dans chaque composante du curriculum formel (le PFEQ, la PDA, le cadre d'évaluation, les épreuves, les manuels scolaires, les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage). Précisons que ces composantes sont très importantes. En effet, tout enseignement, en l'occurrence l'enseignement du modèle particulière, doit respecter le PFEQ, la PDA et le cadre d'évaluation. De plus, il est bien connu que les manuels jouent un rôle très important en enseignement (Hasni, Morisoli, Samson, & Owen, 2009). Rappelons que ces derniers doivent également respecter le PFEQ pour être approuvés par le Ministère de l'Éducation du Québec (annexe 5).

Finalement, pour compléter notre analyse, il est utile d'investiguer cet enseignement auprès des enseignants. Ainsi, dans le cadre de cette thèse, nous avons cherché à répondre aux questions ci-dessous. Les réponses prennent appui sur plusieurs concepts fondamentaux de la didactique qui ont été présentés dans la deuxième partie de ce chapitre (tableau 8).

Questions générales

Comment une analyse didactique de l'enseignement de la modélisation au secondaire contribue-t-elle à cerner les causes de difficultés de l'enseignement de la science ?

Comment une analyse didactique de l'enseignement du modèle particulaire au secondaire permet-elle de clarifier les causes des difficultés de l'enseignement de ce modèle en particulier et de la modélisation en général ?

Questions particulières

- Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, met-elle en évidence dans l'enseignement de la modélisation au secondaire ?

- Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, la progression des apprentissages, les épreuves d'évaluation, les manuels scolaires, les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulaire ?

- Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum informel, tel que présenté par quelques enseignants, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulaire ?

Chapitre 3. La méthodologie

Introduction

Cette recherche a pour but d'identifier les lacunes dans l'enseignement de la modélisation tel que présentée dans le programme de formation de l'école québécoise et de manière plus particulière, les lacunes dans l'enseignement du modèle particulaire au Québec. Dans ce chapitre, il sera question de l'approche méthodologique. Ainsi, le type de recherche, la posture de la chercheuse, les sources de données, les instruments pour recueillir ces données, les processus associés à leur analyse et les techniques de triangulation seront précisés. Il sera également question de considérations éthiques puisque quelques enseignants ont participé à cette recherche.

3.1. Une étude exploratoire à caractère évaluatif

D'après Thouin (2017), il est plus utile de classifier une recherche en fonction des six visées de la science (explorer, décrire, expliquer, prédire, développer et synthétiser) plutôt qu'en fonction de son approche qualitative ou quantitative. En effet, bien que cette dernière classification (qualitative ou quantitative) soit utile, la classification en fonction de la visée permet de rendre plus explicite la relation entre la recherche et la science : toute recherche devrait nécessairement faire avancer la science en ciblant une ou plusieurs de ses visées. Ainsi, compte tenu des visées de la science, cette section a pour but de montrer que cette recherche est de **type exploratoire** tout en ayant **un caractère descriptif et évaluatif**. Mais avant, il est important de mentionner la raison de cette recherche au-delà de sa pertinence qui a été détaillée au premier chapitre.

Pourquoi cette recherche ?

Plusieurs recherches ont été effectuées pour améliorer l'enseignement de la modélisation. En effet, il a été question de plusieurs travaux au deuxième chapitre de cette thèse. Par exemple, pour amener l'élève à construire un modèle, William et Clement (2015) ont développé le

processus OGEM i.e. observer, générer, évaluer et modifier. De leur côté, Schwartz et al. (2009) ont développé et validé une progression des apprentissages pour construire, utiliser et comprendre la nature des modèles. Orange (2012) soutient que générer un modèle revient à générer une explication. Cet auteur propose de soumettre aux élèves des problèmes de type explicatifs pour les amener à générer des modèles. Les analogies peuvent être de bons moyens pour expliquer (Osborne et Patterson, 2011). Gabel (2005) propose des activités à trois niveaux (expérience, modèle et représentation) pour faciliter la compréhension et l'utilisation des modèles. Pour plus d'exemples, nous invitons le lecteur à se référer au chapitre précédent.

L'enseignement de la modélisation et du modèle particulière au Québec s'inspirent-ils de ces travaux ? La réponse à cette question constitue l'une des raisons de cette recherche. D'autres raisons ont été mentionnées au premier chapitre lorsqu'il a été question de l'importance à la fois de la démarche de modélisation en science et du modèle particulière.

Type de la recherche

Rappelons que cette recherche a pour objectif d'examiner les lacunes dans l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière au Québec. Comme nous n'avons pas trouvé des études semblables à la nôtre, cette recherche est de **type exploratoire**.

Pour atteindre cet objectif, nous avons considéré que la meilleure méthode comportait trois étapes. La première étape revient à déterminer les critères des deux enseignements (l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulière) en s'appuyant sur le cadre conceptuel. Ces critères permettent l'élaboration de grilles d'analyse qui seront détaillées plus loin. La deuxième étape consiste à décrire les deux enseignements, tel que présentés dans le curriculum formel et auprès de certains enseignants, de la manière la plus détaillée possible d'où **le caractère descriptif** de la recherche. Cette description est, ensuite, analysée compte tenu des grilles élaborées à la première étape, ce qui permet d'identifier les lacunes dans l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière au Québec. Ainsi, en plus du caractère descriptif, cette recherche a **un caractère évaluatif**. Cette évaluation est

formative (Van der Maren, 1996), car elle propose des recommandations dans l'enseignement de la modélisation, mais surtout dans l'enseignement du modèle particulière. Soulignons, d'après Pinch (2009) cité par Karsenti et Savoie-Zajc (2018), que la recherche évaluative doit occuper une place importante en éducation. En effet, cette dernière est une science de l'action et l'évaluation permet de la réguler et de l'améliorer.

Par ailleurs, cette recherche implique des documents et quelques enseignants en science. Elle revient donc à **une étude de cas multiple** (Albarello, 2011; Gagnon, 2012). Ces échantillons se veulent « typiques » et non pas des échantillons statistiquement représentatifs, ce qui justifie le choix **d'une méthodologie qualitative**. Le caractère non métrique des contenus des documents et des données narratives des enseignants confirme ce type de méthodologie.

3.2. La posture de la chercheure : du malaise à l'interrogation

Toute recherche a pour but de trouver des réponses ou des éléments de réponse à des questions significatives concernant un sujet qui suscite la curiosité, un malaise ou des interrogations, et qui appelle une explication ou, du moins une meilleure compréhension du phénomène à l'étude. (Fortin et Gagnon, 2016)

Ayant été chercheure en chimie physique théorique pendant plusieurs années, je suis d'avis que la modélisation est une activité scientifique incontournable. En effet, pour orienter leurs recherches, les chercheurs expérimentateurs et observateurs (dans le cas de l'astrophysique par exemple) ont souvent recours aux résultats de la modélisation. En didactique, tel que mentionné précédemment, plusieurs recherches ont été consacrées à l'enseignement de la modélisation. Malheureusement, en pratique, compte tenu de mon expérience professionnelle en tant qu'enseignante en science et technologie pendant plusieurs années puis en tant que conseillère pédagogique, j'ai constaté des lacunes dans cet enseignement. Cela qui a suscité, chez moi, un malaise puis une curiosité. Pour ce faire, j'ai retenu le cas du modèle particulière en raison de son importance à décrire, expliquer et prédire plusieurs phénomènes qui relèvent de la chimie physique. Pour satisfaire ma curiosité, j'ai, d'une part, adopté une posture **interprétative** pour analyser et comprendre l'enseignement de la

modélisation et du modèle particulière à partir de plusieurs documents et des entretiens d'enseignants (Fortin et Gagnon, 2016; Karsenti et Savoie-Zajc, 2018) et, d'autre part, une posture **évaluative** pour améliorer ces enseignements (Karsenti et Savoie-Zajc, 2018).

Par ailleurs, j'ai également considéré l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière du point de vue curriculaire. Trois niveaux peuvent situer le caractère curriculaire d'une étude : Macro, Méso et Micro (Jonnaert, 2015; Jonnaert, Ettayebi et Defise, 2009). Le premier (Macro) relève des politiques éducatives. Il concerne les visées éducatives, scolaires ou formatives et les attentes de l'institution. Le deuxième (Méso) questionne le processus d'opérationnalisation des politiques éducatives. « Quels contenus? Quelle organisation? Quelles références? Quelle démarche d'enseignement? Quelle programmation? Quelle formation des enseignants? [...] » (Lebeaume, Zaid et Magneron, 2020). Le troisième (Micro) concerne la mise en œuvre en classe, c'est-à-dire les choix pédagogiques des enseignants, les activités proposées aux élèves, etc. (Lebeaume, Zaid et Magneron, 2020). Par rapport à ces trois niveaux, cette thèse se situe au croisement Méso, puisqu'elle questionne le curriculaire formel, et Micro, car elle interroge les pratiques des enseignants.

3.3. Le corpus de document à analyser

Le curriculum formel est constitué de l'ensemble des documents écrits (le corpus) sur lequel repose l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière au secondaire. Ce corpus est composé du programme de formation de l'école québécoise au premier cycle et au deuxième cycle du secondaire, de la progression des apprentissages au secondaire, du cadre d'évaluation au premier cycle et au deuxième cycle du secondaire, des épreuves de science et de technologie, des manuels scolaires, des guides d'enseignement approuvés par le Ministère de l'éducation et de l'enseignement supérieur (annexe 5) et des cahiers d'apprentissage.

Les programmes de formation en science et technologie

Pour tenir compte des champs d'intérêts et des aptitudes des élèves, deux parcours de formation sont offerts à partir du deuxième cycle du secondaire en science et technologie (tableau 10). L'un des parcours correspond au programme Science et technologie (ST) et l'autre au programme Applications technologiques et scientifique (ATS). Le programme ST est complété par un programme optionnel Science et technologie de l'environnement (STE) et le programme ATS, par le programme optionnel Science et environnement (SE).

Tableau 10 : Parcours de formation en science et technologie

1 ^{er} Cycle	2 ^e Cycle				
	3 ^e secondaire	4 ^e secondaire		5 ^e secondaire	
Science et technologie	Science et technologie		STE		
	6 Unités	4 Unités	4 Unités	Chimie	Physique
8 unités	Applications technologiques et scientifiques		SE	4 Unités	4 Unités
	6 Unités	6 Unités	2 Unités		

Les deux programmes ont des orientations différentes. Le programme ST a une orientation conceptuelle alors que le programme ATS a une orientation plus pratique qui s'appuie, entre autres, sur des applications liées à sept champs technologiques : technologies médicales, technologies agricoles et agroalimentaires, technologies de l'énergie, technologies de l'information et de la communication, technologies des transports, technologies de production manufacturière et technologies de la construction (Programme de formation de l'école québécoise ATS, MELS, 2011).

Bien que les orientations des deux programmes soient différentes, soulignons qu'en y incluant les programmes optionnels STE et SE des programmes ST et ATS respectivement, les concepts prescrits dans les deux programmes sont semblables dans l'ensemble à la fin de la 2^e année du

2^e cycle. En effet, en comparant les deux progressions des apprentissages des deux programmes en question (ST et ATS), nous avons observé que plusieurs concepts scientifiques, désignés par un losange ◆, sont obligatoires dans le programme ST alors qu'ils ne font pas partie du programme ATS. Cependant, la majorité de ces concepts se retrouvent dans la progression des apprentissages du programme optionnel Science et environnement (SE). De même, plusieurs concepts technologiques, désignés par un losange ◆, sont obligatoire dans le programme ATS, mais ne font pas partie du programme ST. Toutefois, la plupart de ces concepts se retrouvent dans la progression des apprentissages du programme optionnel STE.

Comme nous souhaitons analyser l'enseignement de la modélisation et du modèle particulaire lesquels relèvent de la science plutôt que de la technologie, nous avons choisi, en plus du programme du 1^{er} cycle, le programme Science et technologie (ST) plutôt que celui des Applications technologiques et scientifiques (ATS).

Les progressions des apprentissages en science et technologie

La progression des apprentissages au secondaire est un complément du programme de formation. Elle précise les connaissances sous forme d'énoncés que les élèves doivent acquérir et utiliser chaque année (Progression des apprentissages au secondaire, Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011, p. 3).

Aux deux parcours de formation (section précédente), correspond deux progressions des apprentissages. La première inclut les apprentissages du 1^{er} cycle, les apprentissages du programme Science et technologie du 2^e cycle et les apprentissages du programme optionnel Science et technologie de l'environnement. La deuxième comporte également les apprentissages du 1^{er} cycle, mais elle se distingue de la première par les apprentissages du 2^e cycle lesquels correspondent au programme Applications technologiques et scientifiques et au programme optionnel Science et environnement. Compte tenu de notre choix de programmes, nous avons sélectionné la première progression des apprentissages pour effectuer notre analyse.

Signalons que les connaissances présentées dans la progression des apprentissages sont réparties en quatre univers : l'univers matériel, l'univers vivant, la Terre et l'espace et l'univers technologique. Chacun de ces univers est représenté par un tableau (dans la progression des apprentissages). Deux autres tableaux explicitent les techniques et les stratégies que les élèves pourraient utiliser pour les soutenir à utiliser les démarches en science et technologie.

Le matériel didactique

En ce qui concerne le matériel didactique, précisons que le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur n'approuve que les manuels et les guides d'enseignement. Autrement dit, il ne procède pas à la validation des cahiers d'apprentissage. Cependant, nous avons inclus ces derniers dans le curriculum formel pour plusieurs raisons. Premièrement, ils sont utilisés dans plusieurs écoles⁷, deuxièmement, ils sont plus récents que les manuels et finalement, leurs maisons d'édition soutiennent qu'ils sont conformes à la progression des apprentissages. Rappelons que les manuels ont paru avant la progression des apprentissages. Pour cette recherche, nous avons retenu en priorité les manuels, les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. (ERPI), des éditions de la Chenelière Éducation et des Éditions CEC, car ils sont les plus utilisés dans les écoles. Cependant, compte tenu du principe de la saturation des contenus, nous présenterons au prochain chapitre l'analyse du matériel didactique des deux premières éditions (Les Édition du Renouveau Pédagogique Inc. et la Chenelière Éducation). La liste complète des manuels et guides d'enseignement est disponible à l'annexe 5.

Le cadre d'évaluation

Par ailleurs, en matière d'évaluation, depuis le 1^{er} juillet 2011, l'évaluation s'appuie sur le cadre d'évaluation des apprentissages (Cadre d'évaluation, MELS, 2011). D'après ce cadre, deux volets sont à évaluer en science et technologie : le volet Pratique et le volet Théorique qui représentent respectivement 40 % et 60 % de la note de l'élève. Le volet Pratique permet

⁷ Dans certaines écoles, en particulier les écoles en milieu défavorisé, on n'utilise pas les cahiers d'apprentissage à cause de leur coût.

d'évaluer la compétence 1 (Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique) et la compétence 3 (Communiquer à l'aide des langages utilisés en science et en technologie). Le volet Théorique concerne également la compétence 3 et la compétence 2 (Mettre à profit ses connaissances scientifiques et technologiques). Des critères d'évaluation sont définis pour les deux volets.

À la quatrième année secondaire, pour le volet Théorique dans les deux programmes ST et ATS,

Le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur a la responsabilité de produire une épreuve unique pour les trois sessions d'examen, soit juin, juillet et janvier [...]. Les établissements scolaires sont tenus d'administrer chaque épreuve unique au moment prévu à l'horaire officiel des sessions d'examen. (Document d'information sur les épreuves, MEES, 2019).

Concernant le volet Pratique, les épreuves sont élaborées par les organismes scolaires selon des indications du Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement Supérieur pour assurer une certaine uniformité. De plus, en vue de faciliter la production de ces épreuves, des prototypes d'épreuves de démarche expérimentale et de démarche de conception technologique ont été mis à jour au cours de l'année 2013-2014 (Document d'information sur les épreuves, MEES, 2019).

Les épreuves d'évaluation

Dans cette recherche, nous avons analysé les épreuves du volet théorique. Le volet pratique n'a pas été considéré, car il ne comporte pas la démarche de modélisation. Toutes les épreuves du volet pratique en science concernent la démarche expérimentale (en technologie, le volet pratique concerne la démarche de conception).

Les épreuves analysées sont produites à partir de l'année 2012, car c'est à partir de cette année qu'il y a eu des épreuves uniques, i.e. des épreuves obligatoires dans le cadre de la réforme en 2^e année du 2^e cycle (4^e année du secondaire). Avant l'année 2012, il s'agissait d'épreuves d'appoint; ce sont des exemples d'épreuves qui permettent de s'approprier les nouvelles

exigences de la réforme en matière d'évaluation. Ces épreuves n'étaient pas obligatoires, néanmoins, elles étaient fortement recommandées.

Au premier cycle et en troisième année secondaire, nous avons analysé les épreuves du volet théorique de la commission scolaire de Montréal. En quatrième année secondaire, les épreuves uniques (proposés par le Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement Supérieur) ont été considérées. Précisons qu'au deuxième cycle, les épreuves choisies sont celles qui correspondent au programme de science et technologie (ST).

3.4. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ

D'après les concepts fondamentaux présentés au chapitre précédent, la modélisation scientifique revient à la construction de modèles scientifiques pour expliquer certaines réalités. Ces mêmes modèles sont ensuite utilisés pour expliquer d'autres réalités.

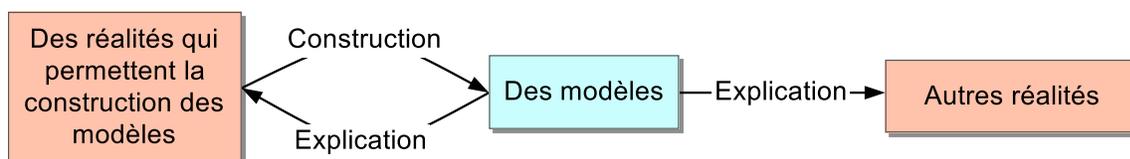


Figure 10 : Représentation de l'enseignement de la modélisation

Ainsi, l'enseignement de la modélisation (figure 10) revient à l'enseignement de la construction de modèles à partir de certaines réalités et à l'utilisation de ces modèles construits pour expliquer d'autres réalités. Cet enseignement implique d'amener l'élève à distinguer une réalité du modèle qui lui est associé (Robardet & Guillaud, 1997). Il implique également l'acquisition de plusieurs connaissances et la compréhension de la nature d'un modèle scientifique. Il est important de souligner l'importance d'un enseignement explicite de la nature d'un modèle, car cet enseignement contribue à la compréhension de la nature de la science (Lederman, 2007) et au développement des conceptions épistémologiques des élèves dont il a été question dans la première partie de cette thèse.

Les grilles d'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ

En vue d'analyser l'enseignement de la modélisation dans les programmes de formation du premier et du deuxième cycle, quatre grilles ont été élaborées par la chercheure à partir des concepts développés dans le cadre conceptuel. Ces grilles sont associées à l'enseignement : 1- de la construction des modèles scientifiques, 2- de l'utilisation des modèles scientifique, 3- des connaissances en lien avec la modélisation et 4- de la nature du modèle scientifique.

Il est important de souligner qu'elles ont été évaluées par un jury de spécialistes de la didactique des sciences lors du dépôt du devis de la recherche. À la suite de cette évaluation, une mise au point de chaque grille a été effectuée, ce qui a permis la production des versions finales. Cette façon de faire a permis de valider les grilles par une triangulation de chercheurs.

La grille d'analyse de l'enseignement de la construction des modèles dans le PFEQ

La grille d'analyse de l'enseignement de la construction des modèles (tableau 11) dans le programme de formation regroupe plusieurs critères dont il a été question dans le cadre conceptuel. Parmi ces critères, l'orientation épistémologique du programme de formation de l'école québécoise. En effet, il est intéressant de déterminer si le programme mentionne l'importance de construire des modèles auquel cas, il aurait une orientation constructiviste d'après le constructivisme épistémologique abordé au deuxième chapitre. L'importance d'observer et de décrire les réalités qui permettent la construction de modèles, l'importance de générer des explications aux réalités, l'importance d'évaluer et de modifier les explications générées représentent également des critères pour construire des modèles d'après le processus OGEM (Williams et Clement, 2015). Générer des explications peut s'effectuer au moyen d'analogie (Osborne et Patterson, 2011), des discussions et des discours argumentatifs (Orange, 2012) pour, d'une part, susciter des conflits sociocognitifs et, d'autre part, amener les élèves à découvrir l'aspect social de la science (Driver, Newton et Osborne, 2000).

La grille présente trois colonnes. La première signifie que le critère n'est pas respecté, la deuxième colonne est choisie lorsque le critère est respecté dès le premier cycle et la troisième colonne signifie que le critère est respecté au deuxième cycle.

Tableau 11 : Grille d'analyse de la construction des modèles dans les PFEQ

Critères d'analyse de la construction des modèles dans le PFEQ	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
1. Le PFEQ adopte une orientation constructiviste et mentionne l'importance de construire des modèles.			
2. Le PFEQ précise les réalités qui permettent les constructions des modèles (autre que le modèle particulière).			
3. Le PFEQ mentionne l'importance d'observer et de décrire des réalités et des phénomènes (phénoménographie).			
4. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des explications aux réalités et aux phénomènes (phénomémologie).			
5. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des entités non observables, des associations, des mécanismes et des processus pour expliquer des réalités et des phénomènes (phénomémologie).			
6. Le PFEQ mentionne l'importance des analogies pour générer des explications (des modèles).			
7. Le PFEQ mentionne l'importance des discussions pour générer des explications (des modèles).			
8. Le PFEQ mentionne l'importance d'évaluer et de modifier si nécessaire l'explication générée.			
9. Le PFEQ mentionne l'importance des discours argumentatifs pour évaluer et modifier les explications et les modèles générés.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

La grille d'analyse de l'enseignement de l'utilisation des modèles dans le PFEQ

En plus de l'enseignement de la construction de modèles, il est important que ces derniers soient utilisés pour expliquer d'autres réalités, autres que celles pour lesquelles ils ont été construits. L'utilisation des modèles peut être pour représenter, expliquer ou prédire une réalité. Ces trois fonctions représentent justement les critères de la grille d'analyse de l'utilisation des modèles dans le programme de formation (tableau 12). Comme la grille précédente, celle-ci comporte trois colonnes qui indiquent si le critère est respecté ou non. Si le critère est respecté, le cycle est précisé.

Tableau 12 : Grille d'analyse de l'utilisation des modèles dans les PFEQ

Critères d'analyse de l'utilisation des modèles dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
10. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser des modèles déjà établis pour représenter des réalités et des phénomènes.			
11. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser des modèles déjà établis pour expliquer des réalités et des phénomènes.			
12. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser des modèles déjà établis pour prédire des réalités et des phénomènes.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

La grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ

Les deux premières grilles qui sont associées au processus de construction et d'utilisation des modèles, par les élèves, se rapportent à l'enseignement de la démarche de modélisation. En plus de cette démarche, comme tout enseignement, l'enseignement de la modélisation devrait impliquer l'acquisition de plusieurs connaissances. Ainsi, le programme de formation devrait mentionner la connaissance des réalités associées aux modèles. Il a été question précédemment de l'importance de les observer et de les décrire. Il est question, à présent, de l'importance de les nommer et de les comprendre pour les déployer de manière adéquate

dans des contextes donnés. Il est également important de connaître les modèles et leurs énoncés, de distinguer explicitement le modèle de la réalité qu'il explique. Pour mieux comprendre les modèles qui peuvent être souvent abstraits, il est nécessaire d'avoir recours à des dispositifs de visualisation. Finalement, il est important de tenir compte des conceptions non scientifiques des élèves, car elles pourraient constituer un obstacle à l'acquisition des connaissances. Ces connaissances (réalités et modèles), les moyens pour faciliter leurs acquisitions dont les dispositifs de visualisation et la prise en compte des conceptions non scientifiques des élèves ont permis l'élaboration de la grille de l'enseignement des connaissances associées à la modélisation (tableau 13).

Tableau 13 : Grille d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans les PFEQ

Critères d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
13. Le PFEQ mentionne l'importance de connaître les réalités et les phénomènes.			
14. Le PFEQ mentionne l'importance de connaître les modèles.			
15. Le PFEQ mentionne l'importance du principe de différenciation entre le modèle et le phénomène ou la réalité qui lui est associé.			
16. Le PFEQ mentionne l'importance des dispositifs de modes de représentations variés (symboles, schémas, tableaux, etc.).			
Conceptions des élèves			
17. Le PFEQ mentionne l'importance tenir compte des conceptions des élèves et de susciter des conflits de centration et sociocognitifs chez eux			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

La grille d'analyse de l'enseignement de la nature d'un modèle scientifique dans le PFEQ

Il existe une relation entre la modélisation et la nature d'un modèle. En effet, la construction d'un modèle implique que ce dernier est une construction théorique perfectible. Son utilisation pour représenter, expliquer et prédire rend compte de ses fonctions. Néanmoins, il est important de distinguer l'enseignement de la modélisation de celui de la nature des modèles. Ce dernier doit être explicite. Les conceptions épistémologiques non scientifiques des élèves, présentées au premier chapitre confirme l'importance d'un enseignement explicite de la nature des modèles. Cela est en accord avec les propos de Schwartz et col. (2009) qui distinguent, tel que mentionné au deuxième chapitre, la modélisation de la méta-modélisation (elle représente les conceptions épistémologiques des élèves associées aux modèles) bien qu'elles soient étroitement liées. La modélisation permet de comprendre la méta-modélisation et inversement, la méta-modélisation donne du sens à la modélisation.

Ainsi l'enseignement explicite de la nature des modèles a permis de générer la grille d'analyse de cet enseignement dans le programme de formation (tableau 14). Cette grille comporte six critères. Ils rendent compte de sa nature théorique, de ses fonctions : de représenter (au moyen de symboles, d'icônes, etc.); d'expliquer (à partir d'associations, de relations, de mécanismes, de processus, etc.) et de prédire une réalité. Un autre critère fait allusion à son aspect perfectible. Tous ces critères permettent la compréhension de ce qu'est un modèle scientifique et par suite, contribuent à la compréhension de la nature même de la science.

Tableau 14 : Grille d'analyse de la nature d'un modèle scientifique dans le PFEQ

Critères d'analyse de la nature du modèle scientifique dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
18. Le PFEQ mentionne qu'un modèle est une construction théorique.			
19. Le PFEQ mentionne qu'un modèle a pour fonction de représenter une réalité.			
20. Le PFEQ mentionne qu'un modèle a pour fonction de d'expliquer une réalité.			
21. Le PFEQ mentionne qu'un modèle a pour fonction de prédire une réalité.			
22. Le PFEQ mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

3.5. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le corpus de documents

3.5.1. Le contenu du modèle particulière à analyser dans le corpus de documents

Le modèle particulière fait partie de l'univers matériel. Ce dernier est divisé en plusieurs concepts généraux. Au 1^{er} cycle du secondaire, cet univers comporte trois concepts généraux : les propriétés de la matière, les transformations de la matière et l'organisation de la matière (Programme de formation au 1^{er} cycle, Ministère de l'Éducation du Québec, 2004, p. 284-285). À ces concepts généraux, s'ajoutent les fluides et les ondes à la première année du 2^e cycle (Programme de formation au 2^e cycle, Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2009, p. 36-38). Finalement, à la deuxième année du 2^e cycle, certains concepts généraux se spécifient, il est alors question de : 1- propriétés physiques des solutions (au lieu de propriétés de la matière); 2- transformations chimiques (au lieu de transformation de la matière). D'autres concepts s'ajoutent comme l'électricité, le magnétisme et la transformation de l'énergie dans le programme ST et la classification périodique dans le programme STE.

Dans cette recherche, l'électricité, le magnétisme, les ondes et les transformations de l'énergie n'ont pas été considérés, car ils ne sont pas vraiment en lien avec le modèle particulaire. Au contraire, nous avons retenu, d'une part, le modèle particulaire et, d'autre part, les réalités et les phénomènes que ce modèle peut expliquer. Plus précisément, dans le corpus des documents, nous nous sommes intéressée essentiellement **aux énoncés du modèle particulaire** ainsi **qu'aux réalités qui lui sont associées** dont : 1- les états de la matière, 2- la propriété de compressibilité des fluides, 3- les changements d'état, 4- la dissolution, 5- les mélanges, 6-les substances pures, 7- les mélanges hétérogènes, 8- les mélanges homogènes, 9- les solutions, 10- les composés, 11- les éléments, 12- les changements chimiques, 13- la conservation des propriétés caractéristiques lors des changements physiques, 14- la conservation de la masse lors des changements physiques et chimiques.

Tel que présenté au deuxième chapitre, le modèle particulaire comporte huit énoncés. Le premier concerne le concept de particules qui composent la matière. Le deuxième se rapporte au mouvement de ces particules et à la relation entre la température et ce mouvement. Le troisième introduit la notion de vide entre les particules et la répartition uniforme des particules d'un gaz. Le quatrième porte sur l'attraction entre les particules et la relation entre la force d'attraction de deux particules et la distance qui les sépare. Le cinquième énoncé concerne la disposition, le mouvement et l'attraction mutuelle des particules d'une substance à l'état liquide et à l'état solide. Le sixième énoncé introduit le concept de type de particule, lequel permet de distinguer une substance pure d'un mélange. Le septième énoncé suppose que les particules se composent d'une ou de plusieurs sous-entités appelées atomes dont le réarrangement explique les transformations chimiques. Le dernier énoncé décrit la structure d'un atome.

Il est intéressant de souligner que les sept premiers énoncés du modèle particulaire se rapportent au concept de particule et à leurs propriétés. Le huitième énoncé est en lien avec la structure de l'atome. Celle-ci est représentée par les modèles atomiques dont le modèle de

Rutherford, de Rutherford-Bohr et le modèle simplifié. Ces modèles pourraient faire l'objet d'une autre étude, c'est pourquoi ils ne seront pas vraiment abordés dans celle-ci.

Cependant, dans le cas des épreuves d'évaluation, en plus du contenu mentionné précédemment, nous avons inclus les questions qui portent sur les modèles atomiques et le tableau périodique dans lequel les atomes sont classés par ordre croissant de leur numéro atomique. Nous avons jugé utile de les considérer dans le cas des épreuves uniques pour mieux connaître les attentes en lien avec la modélisation et les modèles. En effet, les épreuves, en particulier les épreuves uniques, sont des indicateurs concrets des attentes du programme de formation et, par suite, de ce que l'élève devrait apprendre.

3.5.2. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans le corpus de documents

Le modèle particulaire est un exemple de modèle scientifique. Ainsi, l'enseignement de la modélisation décrit précédemment dans le cas général s'applique au cas particulier du modèle particulaire. Cela permet d'assumer que l'enseignement du modèle particulaire revient à l'enseignement de sa construction, de son utilisation, des connaissances qu'il implique et de sa nature. C'est pourquoi, comme précédemment, quatre grilles ont été développées pour analyser ces enseignements, et ce, pour chaque document (le programme de formation, la progression des apprentissages, les manuels, les guides d'enseignement et des cahiers d'apprentissage et les épreuves). Ces grilles ont été construites en adaptant et en précisant les grilles de l'enseignement de la modélisation. En effet, les critères sont définis à partir des mêmes concepts fondamentaux.

Par ailleurs, plusieurs difficultés dans l'apprentissage du modèle particulaire ont été présentées au deuxième chapitre. Compte tenu de ces difficultés une cinquième grille, qui concerne le soutien à l'apprentissage du modèle particulaire, a été conçue pour chacun des

documents à l'exception des épreuves puisque celles-ci sont des épreuves de fin de cycle ou de fin d'année, donc elles ont pour but d'évaluer l'apprentissage plutôt que de le soutenir.

Pour ne pas alourdir ce chapitre, seules les grilles correspondant à l'enseignement du modèle particulière dans le programme de formation seront présentées. Les grilles correspondant aux autres documents (la progression des apprentissages, les manuels, les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage, les épreuves) sont semblables à celles-ci à part quelques ajustements. Elles seront présentées de manière explicite au quatrième chapitre.

Les grilles d'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le PFEQ

Pour élaborer les grilles d'analyse de l'enseignement du modèle particulière dans le programme de formation, des adaptations et des précisions ont été apportées aux grilles d'analyse de la modélisation. La première précision concerne les réalités à partir desquelles le modèle particulière est construit. D'après les énoncés du modèle particulière, il est question des trois états de la matière dans le troisième, quatrième et cinquième énoncé; des substances pures et des mélanges dans le sixième énoncé et d'une réaction chimique dans le septième énoncé. En conséquence, les sept premiers énoncés du modèle particulière ont été construits pour expliquer ces quatre réalités (les états de la matière, les substances pures, les mélanges et la réaction chimique). Ainsi, le deuxième critère du tableau 15, qui est en lien avec les réalités qui permettent la construction du modèle particulière, peut avoir une appréciation plus précise, s'il est respecté, en examinant le nombre de réalités auxquelles le programme de formation fait allusion pour la construction du modèle particulière. Ainsi, si ce nombre est respectivement égale à un, deux, trois ou quatre alors l'appréciation du critère est qu'il est respecté avec peu de réalités, avec quelques réalités, avec la majorité des réalités et avec toutes les réalités (tableau 16).

Tableau 15 : Grille d'analyse de la construction de modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse de la construction de modèles dans le PFEQ	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
1. Le PFEQ adopte une orientation constructiviste et mentionne l'importance de construire le modèle particulière.			
2. Le PFEQ précise les réalités qui permettent la construction du modèle particulière.			
3. Le PFEQ mentionne l'importance d'observer et de décrire les réalités et les phénomènes en lien avec la construction du modèle particulière (phénoménographie).			
4. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des explications aux réalités et aux phénomènes en lien avec la construction du modèle particulière (phénoménologie).			
5. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des entités non observables, des associations, des mécanismes et des processus pour expliquer des réalités et des phénomènes en lien avec la construction du modèle particulière (phénoménologie).			
6. Le PFEQ mentionne l'importance des analogies pour générer des explications en lien avec la construction du modèle particulière (des modèles).			
7. Le PFEQ mentionne l'importance des discussions pour générer des explications en lien avec la construction du modèle particulière (des modèles).			
8. Le PFEQ mentionne l'importance d'évaluer et de modifier si nécessaire l'explication générée.			
9. Le PFEQ mentionne l'importance des discours argumentatifs pour évaluer et modifier les explications générées.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 16 : Appréciation du deuxième critère de la grille d'analyse de la construction des modèles dans le PFEQ

Critère / appréciation	Une réalité précisée	Deux réalités précisées	Trois réalités précisées	Quatre réalités précisées
Deuxième critère				
Appréciation	Peu de réalités	Quelques réalités	La majorité des réalités	Toutes les réalités

Tableau 17 : Grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse de l'utilisation de modèles dans le PFEQ	Non	Oui	Oui
		1 ^{er} cycle	2 ^e cycle
10. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulière pour représenter des réalités et des phénomènes.			
11. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulière pour expliquer des réalités et des phénomènes.			
12. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulière pour prédire des réalités et des phénomènes.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

La deuxième et la troisième précisions concernent respectivement les connaissances des réalités associées au modèle particulière et celles de ses énoncés. Les réalités sont au nombre de quatorze et les énoncés sont au nombre de sept tel que nous l'avons vu précédemment. Les tableaux 19 et 20 permettent d'apprécier respectivement le treizième et quatorzième critères.

Tableau 18 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ	Non	Oui	Oui
		1 ^{er} cycle	2 ^e cycle
13. Le PFEQ mentionne l'importance de connaître les réalités.			
14. Le PFEQ précise les énoncés du modèle particulière et l'importance de les connaître.			
15. Le PFEQ mentionne l'importance du principe de différenciation entre le modèle et le phénomène ou la réalité qui lui est associé.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 19 : Appréciation du treizième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ

Critère / appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Treizième critère				

Tableau 20 : Appréciation du quatorzième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ

Critère / appréciation	Peu d'énoncés (1 à 2)	Quelques énoncés (3 à 4)	La majorité des énoncés (5 à 6)	Tous les énoncés de cette étude (7)
Quatorzième critère				

Tableau 21 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse de la nature du modèle particulière dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
16. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière est une construction théorique.			
17. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière a pour fonction de représenter des phénomènes.			
18. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière a pour fonction d'expliquer des phénomènes.			
19. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière a pour fonction de prédire des phénomènes.			
20. Le PFEQ mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.			
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tel que mentionné précédemment, l'apprentissage du modèle particulière présente plusieurs difficultés chez les élèves. C'est pourquoi il est nécessaire que l'enseignement de ce modèle soutienne l'apprentissage, et ce, en ayant recours à des laboratoires, des vidéos pour permettre l'observation et la description des réalités à expliquer. L'utilisation des dispositifs de visualisation, la prise en compte des conceptions non scientifiques des élèves, les

démarches didactiques (Thouin, 2017), etc. sont également des moyens qui facilitent l'apprentissage du modèle. Tous ces moyens permettent d'élaborer la grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière (tableau 22).

Tableau 22 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans le PFEQ	Non	Oui
21. Le PFEQ mentionne l'importance de recourir à une variété de méthodes didactiques (des laboratoires, des démonstrations, des vidéos) pour montrer et décrire une réalité.		
22. Le PFEQ mentionne l'importance des dispositifs variés (des modèles physiques, des modèles virtuels, des icônes, vidéos, etc.) qui visualisent les particules et leurs comportements pour soutenir la compréhension des élèves.		
23. Le PFEQ mentionne l'importance de vérifier l'évolution des conceptions non scientifiques des élèves (en leur demandant de produire des dessins par exemple).		
24. Le PFEQ mentionne l'importance d'une démarche didactique pour construire les énoncés du modèle particulière.		
25. Le PFEQ mentionne l'importance d'impliquer <u>simultanément</u> une réalité, sa représentation symbolique et/ou iconique et l'énoncé du modèle particulière qui l'explique.		
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté		

3.6. Les entretiens avec quelques enseignants

Pour recueillir plus de données et pour enrichir l'analyse de l'enseignement du modèle particulière, des entretiens avec six enseignants ont été entrepris. Ces entretiens ont permis l'analyse des principaux aspects de l'enseignement du modèle particulière dans le curriculum informel.

3.6.1. Les enseignants

Contrairement aux approches quantitatives dont la majorité utilisent un échantillon aléatoire pour qu'il soit le plus représentatif possible de la population ciblée par l'étude, les approches qualitatives utilisent généralement un échantillon typique (Thouin, 2014) susceptible de

produire une description détaillée de ce qui est à l'étude (Bretz, 2008). Notre approche étant qualitative, nous privilégions un échantillon typique d'enseignants de science. Ces enseignants ont été sélectionnés en fonction de plusieurs critères. Premièrement, pour des raisons éthiques, seuls les enseignants volontaires à participer à la recherche ont été acceptés : aucune contrainte n'est imposée, aucune compensation de nature financière ou matérielle n'est accordée aux participants. Deuxièmement, les participants ont, dans leur tâche, l'enseignement de la science et technologie en troisième année du secondaire. En effet, c'est en troisième année du secondaire que l'enseignement du modèle particulaire est prévu par la progression des apprentissages : « Définir le modèle particulaire comme étant une façon de représenter le comportement de la matière. » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011). Troisièmement, les enseignants sont dans des écoles différentes. Le participant A enseigne dans une école privée. Les participants B, C, D et E sont dans des écoles publiques différentes de la même commission scolaire et le participant F travaille également dans une école publique, mais dans une autre commission scolaire. Ce troisième critère permet d'éviter une saturation précoce des données. Une telle saturation peut être due aux planifications et aux conceptions d'enseignement et d'évaluation communes adoptées au sein d'une même école pour un niveau donné et une matière donnée, en l'occurrence l'enseignement de la science en troisième année secondaire. En effet, pour respecter le cadre d'évaluation des apprentissages en science et technologie, chaque école se dote de modalités d'évaluation communes. Cela implique le plus possible une homogénéité en enseignement et en évaluation au sein d'une même école pour une matière donnée. Cette homogénéité se traduit concrètement par des situations d'enseignement et d'évaluation généralement communes qui pourraient provoquer une saturation artificielle des données. Le nombre d'enseignants participants à notre étude est égal à six. Ce nombre peut paraître limité, mais il est réaliste pour une approche qualitative (Thouin, 2014; Arousseau, 2017; Roy et Hasni, 2014). De plus, notre intention n'est pas de généraliser les propos des enseignants participants, mais plutôt de recueillir des données riches en information sur la description de l'enseignement du modèle particulaire. Le profil des enseignants est assez homogène dans la mesure où ils ont tous une formation en science, soit à partir d'un baccalauréat en enseignement des sciences et des

technologies ou en ayant une formation antérieure dans une discipline scientifique complétée par un certificat en enseignement. Ils ont également plusieurs années d'expérience comme le montre le tableau 23.

Tableau 23 : Caractéristiques professionnelles des participants

Participants	A	B	C	D	E	F
Nombre d'années en enseignement des sciences	15	7	11	11	10	24
Nombre d'années en enseignement des sciences en troisième année secondaire	9	2	3	5	5	5

Les participants B, C, D et E ont été recrutés grâce au conseiller pédagogique en science et technologie à la commission scolaire en question. Le candidat A et F ont été recrutés chacun par leur collègue, lesquels sont des connaissances de la chercheuse. Évidemment, pour conserver la confidentialité des participants, leur lieu de travail ne sera pas nommé et leur genre (femme ou homme) ne sera pas précisé. Ainsi, le mot enseignant ou participant (au masculin) sera utilisé.

3.6.2. Les questions des entretiens avec les enseignants

Rappelons que les entretiens avec les enseignants ont pour but d'analyser l'enseignement du modèle particulière dans le curriculum informel. Pour ce faire, chaque enseignant est invité à décrire sa pratique d'enseignement et son déroulement en répondant à des questions. Il est également invité à préciser son intention pédagogique, c'est-à-dire ce que les élèves devraient apprendre, d'après lui, à la suite de son enseignement.

Verbaliser sa pratique d'enseignement n'est pas simple : « Toute action comporte une part implicite dans sa réalisation, précisément pour celui qui l'effectue. » (Vermersch, 2000, p. 18). Pour remédier à cette difficulté, nous avons choisi, dans un premier temps, d'entreprendre des entretiens d'explicitation avec les enseignants sélectionnés. Ces entretiens visent la

verbalisation de leurs actions. Ainsi, nous avons évité de poser des questions qui commencent par « pourquoi » même si les raisons de leurs actions sont utiles.

En théorie, la description des actions d'une pratique permet de comprendre le déroulement de la pratique en question. En pratique, il est impossible que la description des actions soit totale, car cela impliquerait une infinité de détails à verbaliser (Vermersch, 2000), alors nous avons complété l'entrevue d'explicitation par une entrevue semi-dirigée en procédant à un questionnement qui tient compte des objectifs de la recherche.

Ces objectifs sont ceux de l'enseignement du modèle particulière dont il a été question précédemment, c'est-à-dire l'enseignement de la construction du modèle particulière, de son utilisation, de ses énoncés, des réalités qui lui sont associées et de sa nature. De plus, puisque l'apprentissage de ce modèle présente plusieurs difficultés auprès des élèves d'après plusieurs études, alors le soutien à l'apprentissage de ce modèle est également considéré comme un objectif de l'enseignement de ce modèle. Compte tenu de ces objectifs, les questions posées sont les suivantes :

- 1- Quel matériel didactique utilisez-vous et vos élèves ?
- 2- Comment procédez-vous pour enseigner le modèle particulière ?
- 3- Quelles activités proposez-vous aux élèves ?
- 4- À part les activités du cahier, quelles autres activités plus concrètes proposez-vous aux élèves par exemple des laboratoires ?
- 5- Quelles difficultés les élèves éprouvent-ils dans l'apprentissage du modèle particulière ? De quelle façon vous y prenez-vous pour aider vos élèves à surmonter leurs difficultés ?
- 6- Qu'est-ce que les élèves comprennent d'un modèle scientifique ?
- 7- Combien de cours consacrez-vous au modèle particulière ?
- 8- Qu'est-ce que les élèves sont censés apprendre à la suite de l'enseignement du modèle particulière ?

Justification du choix des questions

Tel que mentionné précédemment, comme la description d'une pratique comporte plusieurs détails, il peut arriver que certains soient omis lors des entretiens. Savoir quel matériel est utilisé par le participant et ses élèves (première question) permet de consulter le matériel en question pour prendre connaissance, d'une part, du contenu des savoirs qui s'y trouve et, d'autre part, des activités proposées à l'élève. L'enseignant peut déterminer le contenu à enseigner soit à partir du manuel de l'élève ou du cahier des savoirs et d'activités ou du guide d'enseignement ou des trois documents à la fois. Les activités destinées à l'élève peuvent provenir du manuel (plusieurs questions s'y trouvent), du cahier d'apprentissage ou d'un cahier monté par l'enseignant lui-même à partir du guide d'enseignement. Il est donc important de prendre connaissance du matériel que l'enseignant et l'élève utilisent. Il est à préciser que le cahier monté par l'enseignant, appelé cahier maison, est légal, car il comporte des documents dont la reproduction est permise à l'achat du guide d'enseignement. La deuxième question renseigne sur le pilotage de l'enseignement. Elle permet de savoir si les élèves sont amenés à construire le modèle particulière. Si oui, à partir de quelles réalités. Elle permet également de savoir s'ils sont amenés à l'utiliser et si c'est le cas, pour qu'elles réalités il l'est et pour quelle raison : pour représenter, expliquer ou prédire. La troisième question montre indirectement ce que les élèves apprennent compte tenu des activités qui leur sont proposées. La quatrième question, qui porte sur les activités concrète dont les laboratoires, permet de savoir jusqu'à quel point la dualité entre la théorie et la réalité est prise en considération dans l'enseignement. Si cette dualité est prise en compte, alors elle l'est de quelle façon. Est-ce de manière simultanée comme le recommande Gabel (2005) ? La cinquième question rend compte des difficultés que les élèves pourraient rencontrer dans l'apprentissage de ce modèle et le soutien qui leur ai fourni par l'enseignant. La sixième question concerne la compréhension de la nature du modèle scientifique par les élèves d'après l'enseignant participant. La septième question est un indicateur de l'importance accordée au modèle particulière. En effet, plus de temps est accordé à l'enseignement de ce modèle, plus il est important pour l'enseignant participant. De plus, cette question pourrait permettre au participant de considérer l'utilisation de ce modèle en comptabilisant à la fois les cours où le

modèle est enseigné et les cours où il est utilisé. Finalement, la huitième question permet d'explicitier l'intention pédagogique. Cette question est laissée à la fin de manière délibérée par la chercheuse, car elle ne correspond pas vraiment à une description, elle peut exiger une réflexion de la part du participant.

3.6.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulière auprès de quelques enseignants

À partir de la description des enseignants participants, l'analyse des données est menée dans le but d'apporter des éléments de réponse à des questions comme :

- 1- Les activités proposées par les enseignants permettent-elles d'observer et de décrire des réalités se rapportant à la matière (des laboratoires, des démonstrations, des vidéos, etc.) ?
- 2- Les activités proposées par les enseignants permettent-elles de construire les énoncés du modèle particulière ?
- 3- Les activités proposées par les enseignants permettent-elles d'utiliser le modèle particulière pour représenter, expliquer et prédire des réalités ? Si oui, pour quelles réalités le modèle particulière est-il utilisé ?
- 4- L'enseignement permet-il à l'élève de comprendre la nature du modèle particulière ?
- 5- Les enseignants anticipent-ils les difficultés d'apprentissage des élèves et leurs conceptions non scientifiques ?
- 6- Les enseignants vérifient-ils l'évolution des conceptions des élèves ? Etc.

Comme pour le curriculum formel, des grilles sont également élaborées pour analyser l'enseignement du modèle particulière auprès des enseignants participants. Elles sont présentées et complétées au prochain chapitre.

3.7. Le déroulement de la recherche

La réalisation des analyses prévues dans ce travail suit un ordre déterminé au préalable. Ainsi, nous avons commencé par l'analyse de l'enseignement de la modélisation et du modèle

particulière dans le programme de formation puisque les autres documents s’y réfèrent. Ensuite, nous avons analysé l’enseignement du modèle particulière dans la progression des apprentissages, puis dans les manuels, puis dans les guides d’enseignement, puis dans les cahiers d’apprentissage, finalement dans les épreuves. Les analyses ont été effectuées de manière successive pour guider l’élaboration des questions d’entretiens avec les participants. Par ailleurs, les participants D et E ont consenti à l’enregistrement des entretiens. Ces derniers ont alors été enregistrés, écoutés puis transcrits. Les participants B, C et F avaient exprimé être moins à l’aise d’être enregistrés. La chercheuse a alors pris des notes pendant l’entretien et elle a complété de mémoire la transcription immédiatement après l’échange. Il est à noter que certains entretiens ont nécessité des questions supplémentaires pour amener le participant à apporter plus des précisions. Les questions supplémentaires sont présentées au quatrième chapitre.

3.8. Des considérations éthiques

Toute recherche avec des participants humains exige une éthique. Du point de vue éthique, seuls les participants volontaires, sans compensation matérielle ni autre mesure incitative, ont été acceptés. Les enseignants participants ont été informés qu’ils pouvaient en tout temps se retirer de l’étude. Ils ont été invités à compléter un formulaire de consentement. La chercheuse a expliqué les objectifs de la recherche et a répondu aux questions des participants en toute transparence. Par ailleurs, l’utilisation des données recueillies respecte, en tout temps, la confidentialité des participants. Les données seront détruites après sept ans. Tous les entretiens ont été effectués après l’obtention du certificat d’approbation éthique (annexe 6) du comité plurifacultaire d’éthique de la recherche.

3.9. La rigueur de la recherche

Comment faire confiance aux résultats de cette recherche ? Comment s’assurer que les lacunes identifiées dans cette recherche qui ont trait à l’enseignement de la modélisation et l’enseignement du modèle particulière sont authentiques ? Bien évidemment, c’est la rigueur

scientifique qui assure la valeur des résultats d'une recherche (Fortin & Gagnon, 2016). Savoie-Zajc (2019) suggère fortement de rendre explicite les pratiques mises en œuvre pour soutenir la rigueur scientifique d'une recherche. C'est ce que nous tenterons de faire dans cette section. Le débat sur les critères de scientificité des recherches qualitatives se poursuit (Merriam, 2015) et il n'y a pas de consensus pour le moment. En ce qui concerne cette recherche, nous considérons les critères en lien avec la rigueur méthodologique, ce qui revient à la validité interne, la fiabilité et la validité externe ou ce que Lincoln et Guba (1985) appellent la crédibilité, la fiabilité et la transférabilité (Merriam, 2015). Ces critères impliquent assurément la réalité (ou les réalités) en question et les résultats correspondants. Précisons, d'après les questions de recherche, que pour cette étude, les réalités reviennent à l'enseignement de la modélisation dans le programme de formation de l'école québécoise à l'ordre secondaire et à l'enseignement du modèle particulière dans le curriculum formel et auprès de quelques enseignants du même ordre. Les résultats de la recherche sont les lacunes identifiées dans ces deux enseignements.

La validité interne ou la crédibilité

La validité interne d'une recherche est la correspondance entre les résultats obtenus et la réalité dont il est question. En effet,

Validity deals with the question of how research findings match reality. How congruent are the findings with reality? Do the findings capture what is really there? Are investigators observing or measuring what they think they are measuring? Internal validity in all research thus hinges on the meaning of reality. (Merriam, 2015, p. 242)

Comme la réalité est accessible à partir des données collectées, assurer la validité interne revient nécessairement à assurer la correspondance entre les données collectées et la réalité en question. La triangulation est probablement la stratégie la plus utilisée pour renforcer la validité interne d'une étude, elle est associée à la navigation ou à l'arpentage, où deux ou trois points de mesure permettent la convergence sur un site (Merriam, 2015). Quatre types de triangulation sont proposés : l'utilisation de plusieurs méthodes, de multiples sources de données, plusieurs chercheurs ou plusieurs théories pour confirmer les découvertes

émergentes (Denzin, 1978). Dans cette recherche, nous avons procédé essentiellement à deux types de triangulation. La première est la triangulation des sources de données en considérant six enseignants en science et différents documents : le programme de formation, la progression des apprentissages, six manuels, six guides d'enseignement, six cahiers d'activités, quinze épreuves. La deuxième est la triangulation des méthodes de collectes des données en ayant recours à la fois à des entretiens et à des lectures de documents.

La fiabilité

La fiabilité réfère à la stabilité des résultats i.e. dans le cas où l'étude est refaite, conduira-t-elle aux mêmes résultats ? (Merriam, 2015). Lincoln et Guba (1985) associent la fiabilité d'une étude à la cohérence des résultats avec les données collectées. Dans cette recherche, nous avons pratiqué, tel que mentionné précédemment, la triangulation pour la collecte des données. De plus, pour expliciter l'analyse des données et le processus qui a mené aux résultats, plusieurs notes réflexives ont été présentées. Ces notes concernent le processus d'élaboration des grilles d'analyse, lesquelles ont été évaluées par un jury de spécialistes de la didactique des sciences (lors de la présentation du devis de recherche). Elles ont également trait au contenu à analyser, au choix des questions d'entretien et au déroulement de la recherche. En effet, la triangulation et les notes réflexives sont des stratégies qui permettent de renforcer la fiabilité d'une étude (Fortin & Gagnon, 2016).

La validité externe ou la transférabilité

Pour permettre d'appliquer les résultats d'une étude à d'autres contextes, les notes réflexives et la description dense et détaillée des données et de leur analyse sont des stratégies proposées (Fortin & Gagnon, 2016). Nous avons déjà mentionné la pratique des notes réflexives. Quant aux descriptions, le quatrième chapitre leur est justement consacré. Plusieurs passages de documents et verbatim sont reportés tels quels pour expliciter en détail les données. Les grilles d'analyse sont également présentées et commentées, ce qui facilite leur utilisation à l'enseignement de la modélisation et à l'enseignement du modèle particulière dans d'autres contextes.

Tableau 24 : Synthèse de la méthodologie de la recherche

Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, met-elle en évidence dans l'enseignement de la modélisation au secondaire ?				
Objet de la recherche	Source des données	Outil et méthode de collecte de données	Type de données collectées	Méthode d'analyse
L'enseignement de la modélisation	PFEQ	Lecture du document	Données qualitatives	Analyse du contenu au moyen de grilles élaborées
L'enseignement du modèle scientifique				
Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, la progression des apprentissages, les épreuves d'évaluation, les manuels scolaires, les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulière ?				
L'enseignement du modèle particulière	PFEQ, PDA, Manuel, Guide d'enseignement et cahier d'activités, épreuves	Lecture des documents	Données qualitatives	Analyse du contenu au moyen de grilles élaborées
L'enseignement de la nature du modèle particulière				
Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum informel, tel que présenté par quelques enseignants, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulière ?				
L'enseignement du modèle particulière	Des participants enseignants	Entretien d'explicitation, suivi d'une entrevue semi-dirigée	Données qualitatives	Analyse au moyen de grilles élaborées Analyse au moyen de grilles élaborées
L'enseignement de la nature du modèle particulière				

Chapitre 4. La présentation et l'analyse des résultats

Introduction

Dans un premier temps, ce chapitre a pour but de présenter et d'analyser, d'une part, l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ et, d'autre part, l'enseignement du modèle particulière dans plusieurs documents et à partir d'entretiens avec six enseignants. Les analyses de ces deux enseignements ont permis de mettre en évidence plusieurs lacunes. Celles-ci sont présentées dans un deuxième temps.

4.1. L'analyse de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ

Il est important de rappeler qu'au deuxième cycle du secondaire, nous avons choisi de considérer le programme de formation science et technologie (ST) plutôt que le programme applications technologiques et scientifiques. Tel qu'expliquer au troisième chapitre, ce choix revient au fait que nous nous intéressons à l'enseignement de la modélisation et du modèle particulière, lesquels relèvent tous les deux d'une orientation conceptuelle plutôt que d'une orientation pratique basée sur des applications technologiques.

Les programmes de formation de l'école québécoise au premier (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2006) et au deuxième cycle (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007) ciblent le développement de trois compétences : 1- Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique; 2- Mettre à profit ses connaissances scientifiques et technologiques; 3- Communiquer à l'aide des langages utilisés en science et technologie.

La première compétence est d'ordre méthodologique, plusieurs composantes et éléments constituent cette compétence. Parmi ces éléments : « proposer des explications ou des solutions possibles », « explorer quelques-unes des explications ou des solutions provisoires; sélectionner une explication ou une solution; déterminer les ressources nécessaires et planifier

les étapes de sa mise en œuvre » et « concrétiser un plan d'action » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 14). De plus, elle a pour attente : « Élaboration de conclusions, d'explications ou de solutions pertinentes » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 14). Cette attente et ces éléments montrent que les programmes de formation mentionnent bien l'importance de générer des explications. **Le quatrième critère est donc respecté**, et ce, dès le premier cycle du secondaire.

Au premier cycle du secondaire, l'élève peut utiliser la démarche expérimentale pour mettre en œuvre son plan d'action en science (en technologie, il est question d'une démarche technologique de conception). Dans le programme du deuxième cycle du secondaire, plusieurs autres démarches sont intégrées explicitement dont la démarche de modélisation qui permet de construire des modèles : « au deuxième cycle s'ajoutent de manière plus explicite la démarche d'observation, la démarche de modélisation et la démarche empirique » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 12), d'où l'orientation constructiviste du programme de formation et sa mention de construire des modèles à partir d'une démarche de modélisation, laquelle est définie plus loin. Ainsi, **le premier critère est respecté au deuxième cycle du secondaire**.

Cependant, à l'exception du modèle particulière qui est exclu de cette section puisqu'il sera traité plus loin, le programme ne précise pas les réalités qui permettent la construction des modèles. Ainsi, **le deuxième critère n'est donc pas respecté**.

Par ailleurs, le programme ne mentionne pas l'importance de générer des entités non observables, des associations, des mécanismes ou des processus (phénoménologie) pour expliquer ces réalités ou ces phénomènes (**5^e critère non respecté**). Il ne signale pas l'importance d'évaluer les explications (**8^e critère non respecté**), ni les discussions et les discours argumentatifs comme moyens pour amener l'élève à générer des explications et à les évaluer (**7^e critère et 9^e critère non respectés**).

Tableau 25 : Grille d'analyse de la construction des modèles dans le PFEQ

Critères d'analyse de la construction des modèles dans le PFEQ	Non	Oui	Oui
		1 ^{er} cycle	2 ^e cycle
1. Le PFEQ adopte une orientation constructiviste et mentionne l'importance de construire des modèles.			✓
2. Le PFEQ précise les réalités qui permettent les constructions des modèles (autre que le modèle particulière).	✓		
3. Le PFEQ mentionne l'importance d'observer et de décrire des réalités et des phénomènes (phénoménographie).		✓	✓
4. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des explications aux réalités et aux phénomènes (phénoméologie).		✓	✓
5. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des entités non observables, des associations, des mécanismes et des processus pour expliquer des réalités et des phénomènes (phénoméologie).	✓		
6. Le PFEQ mentionne l'importance des analogies pour générer des explications (des modèles).	✓		
7. Le PFEQ mentionne l'importance des discussions pour générer des explications (des modèles).	✓		
8. Le PFEQ mentionne l'importance d'évaluer et de modifier si nécessaire l'explication générée.	✓		
9. Le PFEQ mentionne l'importance des discours argumentatifs pour évaluer et modifier les explications et les modèles générés.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Bien qu'il soit question de raisonner par analogie dans les stratégies d'analyse (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007), le programme ne précise pas que l'analogie peut être un moyen pour générer des modèles. Ainsi, **le sixième critère n'est pas respecté.**

Dès le premier cycle, la deuxième compétence, qui est d'ordre conceptuel, mentionne explicitement l'importance de décrire des phénomènes (**3^e critère est respecté**), d'utiliser les modèles pour les représenter et les expliquer (**10^e et 11^e critères sont respectés**). Sa composante « Comprendre des phénomènes naturels » regroupe les actions telles que : « [...] les (phénomènes) décrire de manière qualitative, s'en donner une représentation schématique, expliquer les phénomènes à l'aide de loi ou de modèle, [...] » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2006, p. 279). Il n'est pas question de prédire des phénomènes à l'aide de modèles au premier cycle. En revanche, ce critère (**12^e critère**) est respecté au deuxième cycle d'après la définition de la démarche de modélisation (présentée plus loin).

Tableau 26 : Grille d'analyse de l'utilisation des modèles dans le PFEQ

Critères d'analyse de l'utilisation des modèles dans le PFEQ	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
10. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser des modèles déjà établis pour représenter des réalités et des phénomènes.		✓	✓
11. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser des modèles déjà établis pour expliquer des réalités et des phénomènes.		✓	✓
12. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser des modèles déjà établis pour prédire des réalités et des phénomènes.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Comprendre des phénomènes naturels, utiliser des modèles et représenter des phénomènes impliquent la connaissance à la fois des phénomènes et des modèles. Ainsi, **le treizième et quatorzième critères sont respectés**, et ce, dès le premier cycle d'après la deuxième compétence du programme de formation. Toutefois, les programmes de formation ne précisent pas l'importance de distinguer une réalité ou un phénomène du modèle qui lui est associé, ce qui revient au principe de la différenciation entre une réalité et le modèle associé

(15^e critère n'est pas respecté). Il ne cite pas les conceptions des élèves, ni les conflits de centration ou sociocognitifs chez les élèves **(17^e critère n'est pas respecté).**

Pour expliquer le sens de la troisième compétence qui est d'ordre de la communication, on peut lire les propos suivants : « tableaux, graphiques, symboles, schémas, dessins techniques, maquettes, équations mathématiques et modèles sont autant de modes de présentation qui peuvent soutenir la communication [...] » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2006, p. 280). Ces propos montrent bien l'importance des dispositifs des modes de représentation **(16^e critère est respecté).**

Tableau 27 : Grille d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ

Critères d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
13. Le PFEQ mentionne l'importance de connaître les réalités et les phénomènes.		✓	✓
14. Le PFEQ mentionne l'importance de connaître les modèles.		✓	✓
15. Le PFEQ mentionne l'importance du principe de différenciation entre le modèle et le phénomène ou la réalité qui lui est associé.	✓		
16. Le PFEQ mentionne l'importance des dispositifs de modes de représentations variés (symbole, schémas, tableaux, etc.).		✓	✓
Conceptions des élèves			
17. Le PFEQ mentionne l'importance tenir compte des conceptions des élèves et de susciter des conflits de centration et sociocognitifs chez eux	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Le programme du 2^e cycle mentionne plusieurs aspects d'un modèle scientifique dans sa définition de la démarche de modélisation :

La démarche de modélisation consiste à construire une représentation destinée à concrétiser une situation abstraite, difficilement accessible ou carrément invisible. Le modèle élaboré peut prendre diverses formes : texte, dessin, formule mathématique, équation chimique, programme informatique ou maquette. Au fur et à mesure que progresse la démarche de modélisation, le modèle se raffine et se complexifie. Il peut être valide pendant un certain temps et dans un contexte spécifique, mais, dans plusieurs cas, il est appelé à être modifié ou rejeté. Il importe également de considérer le contexte dans lequel il a été construit. Il doit posséder certaines caractéristiques, entre autres celles de faciliter la compréhension de la réalité, d'expliquer certaines propriétés de ce qu'il vise à représenter et de prédire de nouveaux phénomènes observables (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 25).

Tableau 28 : Grille d'analyse de la nature d'un modèle scientifique dans le PFEQ

Critères d'analyse de la nature du modèle scientifique dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
18. Le PFEQ mentionne qu'un modèle est une construction théorique.			✓
19. Le PFEQ mentionne qu'un modèle a pour fonction de représenter une réalité ou un phénomène.		✓	✓
20. Le PFEQ mentionne qu'un modèle a pour fonction de d'expliquer une réalité ou un phénomène.		✓	✓
21. Le PFEQ mentionne qu'un modèle a pour fonction de prédire une réalité ou un phénomène.			✓
22. Le PFEQ mentionne l'aspect communicatif d'un modèle.		✓	✓
23. Le PFEQ mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Parmi ces derniers, nous relevons : 1- l'aspect construit, car il est élaboré à partir d'une démarche de modélisation; 2- L'aspect communicatif, car il peut être un texte, un dessin, une

formule chimique, etc.; 3- l'aspect perfectible puisqu'il se raffine et se complexifie; 4- l'aspect explicatif, car il permet d'expliquer la réalité; 5- l'aspect prédictif, car il peut prédire de nouveaux phénomènes. Cependant, il est important de souligner que le programme ne précise pas comment amener l'élève à s'appropriier ces aspects. Toutes ces données nous permettent de compléter le tableau 28 qui correspond à la grille d'analyse de la nature du modèle scientifique.

4.2. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans le corpus des documents

4.2.1. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans le PFEQ

Le développement des trois compétences ciblées par le programme de formation s'appuie sur la construction et la mobilisation de ressources qui sont, d'une part, les démarches, les stratégies, les attitudes et les techniques et, d'autre part, les concepts prescrits (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 24). Ces derniers sont regroupés en quatre univers : l'univers vivant, l'univers matériel, Terre et espace et l'univers technologique. Tel qu'expliqué dans le troisième chapitre, les concepts retenus, dans le cadre de cette recherche, sont les concepts de l'univers matériel (tableau 29). Rappelons que l'électricité, le magnétisme, les ondes et les transformations de l'énergie ne sont pas considérés puisque le modèle particulaire ne permet pas de les représenter.

Tableau 29 : Concepts retenus de l'univers matériel prescrits dans le PFEQ

Concepts prescrits	1 ^{er} cycle	2 ^e cycle
Propriétés de la matière	Propriétés caractéristiques Température États de la matière	Propriétés physiques caractéristiques : point de fusion, point d'ébullition
Transformations de la matière	Changement physique Changement chimique Conservation de la matière Mélanges Solutions	Transformations physiques : dissolution, dilution, changement de phases Transformations chimiques : décomposition et synthèse, oxydation, précipitation Modèle particulaire
Organisation de la matière	Atomes Tableau périodique et ses éléments Molécule	Substance pure (composé, élément) Mélanges homogènes et hétérogènes
Fluides		Fluide compressible et incompressible

Ce tableau montre que le modèle particulaire est prescrit au deuxième cycle, plus précisément en troisième année secondaire (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007).

Tableau 30 : Grille d'analyse de la construction du modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse de la construction de modèles dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
1. Le PFEQ adopte une orientation constructiviste et mentionne l'importance de construire le modèle particulière.			✓
2. Le PFEQ précise les réalités qui permettent la construction du modèle particulière.			✓
3. Le PFEQ mentionne l'importance d'observer et de décrire les réalités et les phénomènes en lien avec la construction du modèle particulière (phénoménographie).			✓
4. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des explications aux réalités et aux phénomènes en lien avec la construction du modèle particulière (phénomémologie).	✓		
5. Le PFEQ mentionne l'importance de générer des entités non observables, des associations, des mécanismes et des processus pour expliquer des réalités et des phénomènes en lien avec la construction du modèle particulière (phénomémologie).	✓		
6. Le PFEQ mentionne l'importance des analogies pour générer des explications en lien avec la construction du modèle particulière (des modèles).	✓		
7. Le PFEQ mentionne l'importance des discussions pour générer des explications en lien avec la construction du modèle particulière (des modèles).	✓		
8. Le PFEQ mentionne l'importance d'évaluer et de modifier si nécessaire l'explication générée.	✓		
9. Le PFEQ mentionne l'importance des discours argumentatifs pour évaluer et modifier les explications générées.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

D'après l'extrait du programme de formation du deuxième cycle, ci-dessous, qui concerne le modèle particulaire, il est question de la construction de ce modèle. Ainsi, **le premier critère est donc respecté**. Cette construction a pour point de départ l'observation du comportement de la matière lors des transformations d'état, ce qui permet de confirmer que **le deuxième et troisième critères sont respectés**, et ce, à partir **d'une seule réalité** (tableau 30).

Selon l'énergie d'agitation moyenne des molécules qui la composent, une même substance se présente sous la forme d'un liquide, d'un solide ou d'un gaz. Une variation de cette énergie entraîne des transformations réversibles.

L'observation du comportement de la matière au cours de ces transformations constitue le point de départ de la construction d'un modèle particulaire de la matière, qui rassemble toutes les qualités d'un bon modèle : il met en relation différentes observations, il explique les comportements observés, il permet d'en prédire de nouveaux et il est perfectible (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 37).

Tableau 31 : Appréciation du deuxième critère de la grille d'analyse de la construction du modèle particulaire dans le PFEQ

Critère / appréciation	Une réalité précisée	Deux réalités précisées	Trois réalités précisées
Deuxième critère	✓		

La façon de procéder pour construire le modèle particulaire n'est pas spécifiée, ce qui revient à dire que **du quatrième critère au neuvième inclusivement ne sont pas respectés**.

Tableau 32 : Grille de l'utilisation du modèle particulaire dans le PFEQ

Critères d'analyse de l'utilisation de modèles dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
10. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulaire pour représenter des réalités et des phénomènes.			✓
11. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulaire pour expliquer des réalités et des phénomènes.			✓
12. Le PFEQ mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulaire pour prédire des réalités et des phénomènes.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle ; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Par ailleurs, d'après l'extrait du programme de formation ci-dessus, le modèle particulaire peut être utilisé pour expliquer et prédire des réalités et des phénomènes (**11^e et 12^e critères sont respectés au 2^e cycle**). Il est également noté que le modèle particulaire a toutes les qualités d'un modèle : il permet donc de représenter une réalité (**10^e critère est respecté**). Cependant, il n'y a aucune précision sur les réalités observées qui sont censées être représentées, expliquées et prédites par le modèle.

Tableau 33 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulaire dans le PFEQ

Critères d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
13. Le PFEQ mentionne l'importance de connaître les réalités.		✓	✓
14. Le PFEQ précise les énoncés du modèle particulaire et l'importance de les connaître.	✓		
15. Le PFEQ mentionne l'importance du principe de différenciation entre le modèle et le phénomène ou la réalité qui lui est associé.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Quant aux connaissances, les réalités en lien avec le modèle particulaire sont toutes prescrites dans le programme de formation. En effet, on y retrouve : 1- les trois états de la matière, 2- la compressibilité, 3- les changements d'état, 4- la dissolution, 5- les mélanges, 6- les substances pures, 7- mélanges hétérogènes, 8- les mélanges homogènes, 9- les solutions, 10- les composés, 11- les éléments, 12- les changements chimiques, 13- la conservation des propriétés caractéristiques lors d'un changement physique, 14- la conservation de la matière. Ainsi le **treizième critère est respecté**.

Tableau 34 : Appréciation du treizième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans le PFEQ

Critère / appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Treizième critère				✓

Cependant, le programme ne précise pas les énoncés du modèle particulière et il ne mentionne pas non plus le principe de différenciation entre le modèle et la réalité qui lui est associée (**14^e et 15^e critères ne sont pas respectés**).

Tableau 35 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulière dans le PFEQ

Critères d'analyse de la nature du modèle particulière dans le PFEQ	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
16. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière est une construction théorique.			✓
17. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière a pour fonction de représenter des phénomènes.			✓
18. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière a pour fonction d'expliquer des phénomènes.			✓
19. Le PFEQ mentionne que le modèle particulière a pour fonction de prédire des phénomènes.			✓
20. Le PFEQ mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tel que noté précédemment, compte tenu que le modèle particulière a toutes les qualités d'un modèle d'après l'extrait du programme de formation précédent, **les critères du tableau 35 sont respectés au 2^e cycle**.

Tableau 36 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire dans le PFEQ

Critères d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire dans le PFEQ	Non	Oui
21. Le PFEQ mentionne l'importance de recourir à une variété de méthodes didactiques (des laboratoires, des démonstrations, des vidéos) pour montrer et décrire un phénomène.	✓	
22. Le PFEQ mentionne l'importance des dispositifs variés (des modèles physiques, des modèles virtuels, des icônes, vidéos, etc.) qui visualisent les particules et leurs comportements pour soutenir la compréhension des élèves.	✓	
23. Le PFEQ mentionne l'importance de vérifier l'évolution des conceptions non scientifiques des élèves (en leur demandant de produire des dessins par exemple).	✓	
24. Le PFEQ mentionne l'importance d'une démarche didactique pour construire les énoncés du modèle particulaire.	✓	
25. Le PFEQ mentionne l'importance d'impliquer <u>simultanément</u> un phénomène, sa représentation symbolique et/ou iconique et l'énoncé du modèle particulaire qui l'explique.	✓	
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté		

Concernant le soutien à l'apprentissage, le programme ne mentionne pas l'importance de recourir à des laboratoires, des démonstrations ou des vidéos pour décrire un phénomène (**21^e critère n'est pas respecté**). Il ne cite pas non plus les dispositifs qui permettent aux élèves de visualiser les particules et leurs comportements (**22^e critère n'est pas respecté**) ni les problèmes qui impliquent simultanément 1- un phénomène, 2- sa représentation symbolique et iconique et l'énoncé du modèle particulaire qui l'explique (**25^e critère n'est pas respecté**). Il n'est pas question des conceptions non scientifiques des élèves (**23^e critère n'est pas respecté**) ni de démarches didactiques pour construire les énoncés du modèle particulaire (**24^e critère n'est pas respecté**). Ces constats permettent de compléter le tableau 36.

4.2.2. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans la PDA⁸

L'examen de la progression des apprentissages (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011) montre qu'il n'est question nulle part de démarches scientifiques, en l'occurrence, de

⁸ La PDA a été produite en 2011, c'est-à-dire après le PFEQ.

démarche de modélisation qui permet la construction de modèles dont le modèle particulaire. La progression des apprentissages pour générer, évaluer et modifier des modèles est inexistante, et ce, même au deuxième cycle du secondaire. Aussi, la progression des apprentissages ne mentionne pas les étapes qui permettent la construction des énoncés du modèle particulaire. Ainsi, la grille d'analyse de la construction du modèle particulaire dans la progression des apprentissages ne sera pas complétée **puisque aucun critère de cette grille n'est respecté.**

En revanche, l'utilisation du modèle particulaire est mentionnée en troisième année du secondaire pour représenter des phénomènes (**1^{er} critère est respecté au 2^e cycle**). En effet, on peut lire « illustrer des transformations physiques à l'aide du modèle particulaire », « représenter une réaction de décomposition ou de synthèse à l'aide du modèle particulaire », « représenter une réaction d'oxydation à l'aide du modèle particulaire », « représenter une réaction de précipitation à l'aide du modèle particulaire », et « représenter la conservation de la masse à l'aide du modèle particulaire » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011, pp. 9-10).

Tableau 37 : Grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans la PDA

Critères d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans la PDA	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
1. La PDA mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulaire pour représenter des réalités.			✓
2. La PDA mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulaire pour expliquer des réalités.			✓
3. La PDA mentionne l'importance d'utiliser le modèle particulaire pour prédire des réalités.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Il est également question d'utiliser le modèle particulaire pour expliquer le phénomène de dissolution « expliquer le phénomène de dissolution à l'aide du modèle particulaire » et les phénomènes de changements d'état « expliquer un changement d'état à l'aide du modèle particulaire » (Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011, p. 9). Ainsi, **le deuxième critère est respecté au deuxième cycle**. La prédiction d'une réalité au moyen du modèle particulaire n'est pas prescrite dans la progression des apprentissages donc, **le troisième critère n'est pas respecté**.

Tableau 38 : Appréciation du premier et deuxième critères de la grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans la PDA

Critère / appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Premier critère	✓			
Deuxième critère	✓			

D'après la progression des apprentissages, le modèle particulaire permet de représenter deux réalités. La première concerne les changements chimiques dont les réactions d'oxydation, de précipitation et de synthèse. La deuxième réalité est la conservation de la masse lors d'un changement. Il permet également d'expliquer deux réalités qui sont : la dissolution et les changements d'état. Ces données montrent que le modèle particulaire est utilisé pour représenter et expliquer peu de réalités dans la progression des apprentissages.

Tableau 39 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans la PDA

Critères d'analyse des connaissances associées à la modélisation dans le PDA	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
4. La PDA mentionne l'importance de connaître les réalités.		✓	✓
5. La PDA précise les énoncés du modèle particulière et l'importance de les connaître.	✓		
6. La PDA mentionne l'importance du principe de différenciation entre le modèle et la réalité qui lui est associée.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Par rapport aux connaissances, la progression des apprentissages respecte le programme de formation. Ainsi, toutes les réalités prescrites dans le programme de formation se retrouvent également dans la progression des apprentissages (**4^e critère respecté pour toutes les réalités**). En revanche, les énoncés du modèle particulière et le principe de différenciation ne sont pas indiqués (**5^e et 6^e critères ne sont pas respectés**).

Tableau 40 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans la PDA

Critère / appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Quatrième critère				✓

Concernant la nature du modèle particulière, on peut lire à la page 9 : « Décrire le modèle particulière en fonction des qualités et des limites d'un modèle en science ». Bien que la progression des apprentissages ne précise pas les qualités d'un modèle scientifique, on peut considérer qu'elle mentionne explicitement la nature du modèle particulière, ce qui nous permet de compléter le tableau 41.

Tableau 41 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulaire dans la PDA

Critères d'analyse de la nature du modèle particulaire dans la PDA	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
7. La PDA mentionne que le modèle particulaire est une construction théorique.			✓
8. La PDA mentionne que le modèle particulaire a pour fonction de représenter une réalité.			✓
9. La PDA mentionne que le modèle particulaire a pour fonction de d'expliquer une réalité.			✓
10. La PDA mentionne que le modèle particulaire a pour fonction de prédire une réalité.			✓
11. La PDA mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Comme pour le programme de formation, les critères qui correspondent au soutien à l'apprentissage (tenir compte des conceptions non scientifiques des élèves, des dispositifs pour visualiser le comportement des particules, la dualité entre, d'une part, la réalité ou le phénomène et, d'autre part, l'énoncé du modèle particulaire qui l'explique, etc.) ne figurent pas dans la progression des apprentissages, ce qui permet de compléter le tableau 42.

Tableau 42 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire dans la PDA

Critères d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire dans la PDA	Non	Oui
12. La PDA mentionne l'importance de recourir à une variété de méthodes didactiques (des laboratoires, des démonstrations, des vidéos) pour montrer et décrire une réalité.	✓	
13. La PDA mentionne l'importance des dispositifs variés (des modèles physiques, des modèles virtuels, les icônes, vidéos, etc.) qui visualisent les particules et leurs comportements pour soutenir la compréhension des élèves.	✓	
14. La PDA mentionne l'importance de vérifier l'évolution des conceptions non scientifiques des élèves (en leur demandant de produire des dessins par exemple).	✓	
15. La PDA mentionne l'importance d'une démarche didactique pour construire les énoncés du modèle particulaire.	✓	
16. La PDA mentionne l'importance d'impliquer <u>simultanément</u> une réalité, sa représentation symbolique et/ou iconique et l'énoncé du modèle particulaire qui l'explique.	✓	
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté		

4.2.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les manuels scolaires

4.2.3.1. Le contenu des manuels des éditions du nouveau pédagogique INC. (ERPI)

Éditions du Nouveau Pédagogique Inc. proposent un manuel de l'élève par niveau scolaire. De la première année à la quatrième année du secondaire, le contenu des manuels est organisé en quatre univers : l'univers matériel, l'univers vivant, la Terre et l'espace et l'univers technologique. Chaque univers comporte deux ou plusieurs chapitres. Nous avons examiné les chapitres de l'univers matériel de Univers 1 (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006), de Univers 2 (Bélanger, Chantal, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 2, 2006), de Observatoire 3 (Cyr & Verreault, 2007) et de Observatoire 4 (Cyr, Verreault, & Forget, 2008). Bien que cette étude ne traite pas des modèles atomiques, il est intéressant de les noter dans le tableau 43 puisqu'ils sont en lien avec le modèle particulaire, plus précisément avec son huitième énoncé d'après de Vos & Verdonk (1996).

Tableau 43 : Contenu en lien avec le modèle particulaire

Manuel	Titre du chapitre	Contenu du chapitre en lien avec le modèle particulaire
Univers 1	1- Les propriétés de la matière	1- La température, 2- les trois états de la matière : solide, liquide et gazeux, 3- la propriété de compressibilité, 4- le point de fusion, 5- le point d'ébullition, 6- la solubilité et 7- la conductibilité électrique.
	2- Les transformations de la matière	1- Les changements physiques, 2- les changements d'état, 3- les mélanges : hétérogènes, homogènes et 4- les solutions.
Univers 2	1- Les transformations de la matière	Les changements chimiques et des exemples de réactions chimiques.
	2- L'organisation de la matière	Le tableau périodique et ses éléments, les modèles atomiques et les atomes, les molécules.
Observatoire L'humain	1- L'humain et l'organisation de la matière	Le modèle particulaire, les molécules et les atomes, les mélanges et les substances pures (les éléments et les composés).
	2- L'humain et l'énergie qui l'anime	Les changements physiques : les changements d'état, les dissolutions. Les changements chimiques.
	3- L'humain et les fluides	Les fluides compressibles et non compressibles.
Observatoire L'environnement	1- L'atome et les éléments	Les modèles atomiques, la classification périodique des éléments, la représentation des atomes.
	2- Les molécules et les solutions	Les ions, les liaisons chimiques, les propriétés des solutions.
	3- Les transformations de la matière	Les transformations chimiques.

Cette section présente le contenu en lien avec le modèle particulaire dans les manuels. Elle commence par présenter, d'une part, les réalités pour lesquelles le modèle particulaire est utilisé implicitement ou explicitement et, d'autre part, les énoncés de ce modèle. Elle se termine par l'analyse de ce contenu.

Le contenu du premier cycle en lien avec le modèle particulaire

La température

Dès le premier chapitre de l'univers matériel, la définition de la température est illustrée et reliée à l'agitation des particules. Ainsi, la relation entre la température et le degré d'agitation des particules est introduite de la façon suivante :

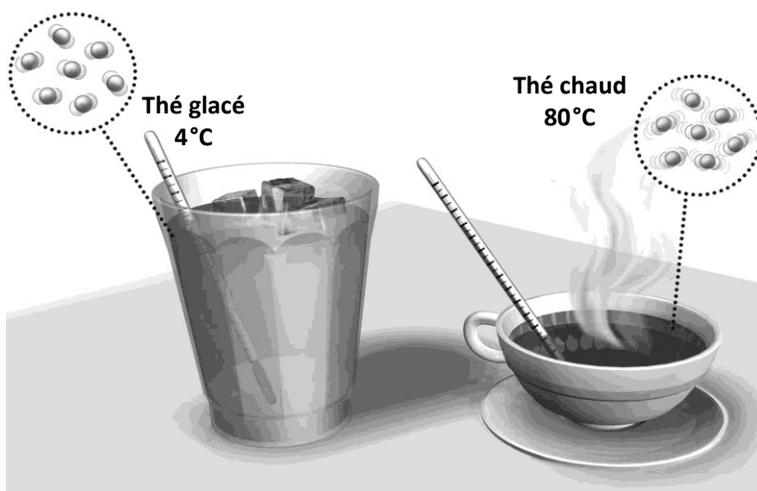


Illustration 1 : « Dans le verre de thé glacé, les particules d'eau, représentées par de petites billes, bougent moins rapidement que dans la tasse du thé chaud ».

La température d'une substance ou d'un objet est la mesure de l'état plus ou moins chaud de cette substance ou de cet objet. L'état plus ou moins chaud d'une substance ou d'un objet dépend de l'agitation des particules (atomes ou molécules) qui composent cette substance ou cet objet. Plus ces particules sont agitées et bougent rapidement, plus sa température est élevée (illustration 1) (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006, p. 11).

Il est intéressant de souligner que le concept de particule n'a pas encore été présenté explicitement. Tel qu'indiqué dans l'extrait, il signifierait atome ou molécule, lesquels ne sont pas encore présentés non plus. De plus, la variation de la relation entre la température et l'agitation des particules (plus ces particules sont agitées et bougent rapidement, plus sa température est élevée) représente partiellement le deuxième énoncé du modèle particulaire (une relation directe entre la température d'une quantité de la matière et l'énergie cinétique moyenne de ses particules) présenté au deuxième chapitre. Ainsi, la relation entre la

température et l'agitation des particules est introduite sans mentionner explicitement le modèle particulaire.

Les états de la matière et la propriété de compressibilité

Chaque état de la matière est décrit à partir de deux propriétés macroscopiques : le volume (défini ou indéfini) et la forme (déterminée ou indéterminée). Cette description est mise en évidence en caractères gras dans le manuel. De plus, chaque état est présenté au moyen de particules. Ainsi, l'état solide est présenté comme suit :

Il (le bloc de métal pour illustrer l'état solide) conservera sa forme et son volume quel que soit le contenant dans lequel on le placera. Les particules (atomes ou molécules, représentés dans l'illustration 2) qui composent le bloc de métal sont solidement liées les unes aux autres. Elles n'ont donc pas la possibilité de se déplacer les unes par rapport aux autres [...].

De plus comme les particules qui composent le bloc de métal sont très près les unes des autres, le bloc ne peut pas être comprimé de façon significative. Il gardera donc pratiquement le même volume quel que soit la pression qu'on exerce sur lui.

Un solide a un volume défini et une forme qu'il a tendance à garder, mais qui peut être modifiée. Il est pratiquement incompressible (il ne peut être comprimé de façon significative) (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006, p. 14).



Illustration 2

L'état liquide est introduit en considérant l'exemple de l'eau.

L'eau (ou tout autre liquide) épousera la forme du contenant dans lequel elle sera versée, car les particules (illustration 3) qui la composent sont faiblement liées entre elles. Elles peuvent donc glisser les unes sur les autres. Cependant, si l'on exerce une pression sur un liquide, son volume ne changera pratiquement pas parce que ses particules sont très près les unes des autres. Un liquide ne peut donc être comprimé de façon significative. **Un liquide a un volume défini, mais il n'a pas de forme déterminée. Il est pratiquement incompressible (il ne peut être comprimé de façon significative)** (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006, p. 14)



Illustration 3

L'état gazeux est présenté comme suit :

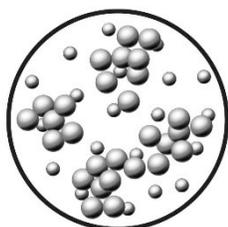
Un gaz prendra la forme d'un contenant dans lequel il sera placé parce que les particules qui le composent ne sont pas liées entre elles (illustration 4). Ces particules se déplacent donc rapidement les unes par rapport aux autres. De plus, comme les particules d'un gaz sont éloignées les unes des autres et bougent dans tous les sens, le gaz aura tendance à occuper tout le volume disponible. Si l'on exerce une pression sur lui, son volume diminuera. Un gaz peut être comprimé. **Un gaz n'a pas de volume défini ni de forme déterminée. Il est compressible (il peut être comprimé)** (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006, p. 15)



Illustration 4

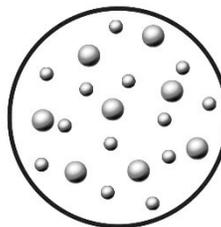
Les mélanges et les solutions

Dans le deuxième chapitre du manuel Univers 1, il est question de mélanges. Ces derniers sont définis par une association de plusieurs substances. Si on peut distinguer les différents constituants d'un mélange alors, il est hétérogène, sinon, il est homogène. (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006). Par ailleurs, on illustre et on présente le mélange hétérogène et homogène par respectivement la distribution non uniforme (illustration 5) et uniforme (illustration 6) des particules des divers constituants (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006).



Cercle A

Illustration 5



Cercle B

Illustration 6

Les solutions sont décrites comme étant un mélange homogène dans lequel une ou plusieurs substances sont dissoutes dans une autre substance. Cette dernière est dite solvant et la substance dissoute est appelée soluté (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006).

Les changements d'état

Les six changements d'état sont définis comme étant des changements physiques, lesquels sont considérés comme des transformations qui ne modifient pas la nature des substances. Ils sont nommés et décrits à partir de réalités. Par exemple, « le passage de la phase solide à la phase liquide est la fusion. À l'inverse, le passage de la phase liquide à la phase solide est la solidification » (Bélanger, Chatel, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006, p. 44). Il est intéressant de souligner que le concept de particule n'est pas utilisé dans le cas des changements d'état contrairement aux réalités précédentes i.e. la température, les états de la matière la compressibilité et les mélanges homogènes et hétérogènes.

Les changements chimiques

En deuxième année du premier cycle, un changement chimique est défini comme étant une transformation qui change la nature et les propriétés caractéristiques de la matière ce qui produit de nouvelles substances. Des exemples de réactions chimiques (la combustion, la respiration cellulaire, la photosynthèse, la fermentation, l'oxydation) sont présentés. Les réactifs et les produits de ces réactions sont nommés. Ainsi, on n'utilise pas le concept de particule pour présenter ces réactions au premier cycle. En revanche, on présente des indices

observables qui permettent de reconnaître des transformations chimiques comme : changement de couleur, dégagement d'un gaz, changement de température, formation de précipité, dégagement d'énergie et irréversibilité plus probable du changement (Bélanger, Chantal, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 2, 2006).

L'organisation de la matière

Le deuxième chapitre du manuel Univers 2, qui s'intitule « l'organisation de la matière », commence par présenter ce qu'est un élément : « une substance qui ne peut pas être séparée en d'autres substances par des moyens physiques ou chimiques » (Bélanger, Chantal, & St-André, 2006, p. 33). Ensuite, ce chapitre présente plusieurs concepts théoriques : 1- les symboles chimiques, 2- le tableau périodique des éléments, 3- le numéro atomique, 4- la masse atomique, 5- le modèle de Démocrite qui a exprimé l'idée que la matière était constituée de petites billes indivisibles et 6- le modèle atomique de Dalton qui regroupe les quatre énoncés suivants :

- Toute la matière est constituée d'atomes. Les atomes sont tellement petits qu'il est impossible de les observer. Ils ne peuvent être ni créés, ni détruits, ni divisés en parties plus petites.
- Tous les atomes d'un même élément sont identiques. Ils ont la même masse.
- Les atomes d'éléments différents sont différents.
- Dans une réaction chimique, les atomes se séparent les uns des autres, s'unissent ou s'assemblent de façon différente pour former de nouvelles substances (Bélanger, Chantal, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 2, 2006, p. 39).

Dans ce même chapitre, on trouve également : 7- L'atome comme étant « la plus petite particule en laquelle un élément peut être divisé par des moyens chimiques », 8- la molécule qui « est un ensemble de deux ou plusieurs atomes liés chimiquement entre eux », 9- un composé, 10- les propriétés des molécules qui sont différentes de celles des atomes qui les composent, 11- la formule chimique, 12- la nomenclature et 13- la représentation de molécules au moyen des boules (Bélanger, Chantal, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 2, 2006).

Le contenu de la troisième année secondaire en lien avec le modèle particulaire

Le modèle scientifique et le modèle particulaire

Au premier chapitre du manuel de la troisième année secondaire, le modèle scientifique est défini comme « une représentation simplifiée de la réalité. Il permet de concrétiser un phénomène, un processus ou un système difficile à percevoir ou abstrait ». Il est également question de son rôle d'expliquer et de prédire : « en science un modèle doit également expliquer les comportements observés, les mettre en relation et en prédire de nouveaux »; et de sa nature perfectible : « tout modèle a ses limites. Un bon modèle peut cependant être modifié et amélioré, au besoin » (Cyr & Verreault, 2007, p. 6).

Le modèle particulaire est présenté comme étant un exemple de modèle scientifique dont les énoncés sont :

1- la matière est constituée de particules extrêmement petites; 2- ces particules sont constamment en mouvement; 3- lorsque la température augmente, le mouvement des particules augmente; 4- les particules peuvent être retenues ensemble par des forces d'attraction (Cyr & Verreault, 2007, p. 6)

Les états de la matière

Les états de la matière sont, d'une part, décrits à partir du volume et de la forme et, d'autre part, expliqués au moyen du modèle particulaire. Comparativement au premier cycle, l'explication à l'aide du modèle particulaire est plus explicite au deuxième cycle. De plus, de nouvelles formulations sont utilisées pour expliquer les états de la matière. Ces formulations font intervenir des propriétés de particules telles que : 1- la disposition, 2- la liberté de mouvement et 3- les forces d'attraction qui sont entre ces particules. Ainsi,

les particules d'un solide sont très près les unes des autres car elles sont retenues par des forces d'attraction importantes. [...] Les particules sont disposées de façon très ordonnée. Les particules des solides ont donc peu de liberté de mouvement. Elles ne peuvent que vibrer sur place. Tout cela donne au solide une structure et une forme définies. C'est pourquoi un solide n'a généralement pas besoin d'être dans un contenant pour conserver sa forme et son volume.

Dans un liquide, les particules sont aussi près les unes des autres. Cependant, elles sont retenues par des forces d'attraction un peu plus faibles que dans le cas des solides. [...]

les particules sont disposées de façon désordonnée. Elles ont donc une plus grande liberté de mouvement que les solides. Elles peuvent notamment glisser les unes sur les autres. Les liquides ont donc un volume défini mais une forme indéfinie. Cela leur permet d'épouser la forme du contenant dans lequel ils sont placés. Si un liquide n'est pas placé dans un contenant, il se répandra.

Les particules d'un gaz sont très espacées les unes des autres et elles ne sont pas retenues par des forces d'attraction. [...], il y a beaucoup d'espace entre les particules. Elles ont donc une très grande liberté de mouvement. En fait, les particules de gaz bougent dans tous les sens. C'est pourquoi elles occupent tout l'espace qui leur est alloué. Les gaz n'ont donc ni forme ni volume définis. Si on ouvre un contenant dans lequel se trouve un gaz, une partie de celui-ci s'en échappera. (Cyr & Verreault, 2007, p. 7)

La compressibilité

La compressibilité est décrite par une diminution du volume sous l'action d'une pression. Pour expliquer cette propriété, on considère, sous l'effet d'une pression, le resserrement des particules d'un gaz qui, sont initialement espacées (Cyr & Verreault, 2007).

Les changements d'état et la dissolution

Au premier cycle, les changements d'état sont nommés et décrits. En troisième année, ils sont expliqués au moyen du modèle particulaire. Il en est de même pour la dissolution. Par exemple, pour expliquer la vaporisation de l'eau, on suppose que l'énergie thermique due au chauffage est transférée aux particules, ce qui augmente leur mouvement et provoque, lorsque l'énergie est suffisante, la rupture des forces d'attraction qui les maintiennent rapprochées. Les molécules se détachent alors les unes des autres d'où le changement d'état i.e. l'eau liquide devient vapeur. Pour expliquer la dissolution du sucre dans l'eau, on suppose également que les forces d'attraction entre les particules du sucre se rompent, ce qui permet une répartition uniforme des particules du sucre et de l'eau (Cyr & Verreault, 2007).

Le concept de particule, d'atome et de molécule

Dans le manuel de la troisième année du secondaire, on précise que « les particules de matière sont en fait des molécules ou des atomes ». L'atome et la molécule sont également

définis : « un atome est la plus petite particule de la matière. Elle ne peut plus être divisée chimiquement ». « Une molécule est un ensemble de deux ou plusieurs atomes liés chimiquement » (Cyr et Verreault, 2007, p. 8).

Les mélanges et les substances pures

Au premier cycle, le concept de substance pure ne fait pas l'objet d'un apprentissage explicite. Il est introduit de manière implicite lorsqu'il est question de point de fusion : « une substance pure, c'est-à-dire une substance dont toutes les particules sont semblables, a un point de fusion propre » (Bélanger, Chatel et St-André, Univers - Manuel de l'élève 1, 2006, p. 18). En troisième année du secondaire, le concept de mélange et de substance pure sont explicitement définis, d'une part, à partir du concept de substance et, d'autre part, à partir du concept de **sorte de particules**. Ainsi, « un mélange est formé d'au moins deux substances différentes, i.e. au moins deux sortes de particules » et « une substance pure est formée d'une seule substance, autrement dit, elle ne contient qu'une seule sorte de particules » (Cyr et Verreault, 2007, p. 9).

Les composés et les éléments

Une substance pure peut être soit un élément, soit un composé. « Un élément est une substance pure composée d'une seule **sorte d'atomes** ». « Un composé est une substance pure dont on peut séparer les constituants à l'aide de techniques de séparation chimiques. Il contient donc au moins deux éléments différents liés chimiquement ». (Cyr & Verreault, 2007, p. 21)

Les changements chimiques

Les changements chimiques sont expliqués en troisième année du secondaire au moyen de modifications **des liaisons entre les atomes** des réactifs, ce qui conduit à de nouveaux produits. Quatre changements chimiques (les synthèses, les décompositions, les oxydations, les précipitations) sont représentés au moyen d'icônes et de formules chimiques impliquant des symboles. La loi de la conservation de la matière est bien mise en évidence.

4.2.3.2. Le contenu des manuels des éditions de Chenelière Éducation

Dès le premier cycle du secondaire, il est question du modèle particulaire. La température, les états de la matière, la compressibilité, les changements d'état et la dissolution sont expliqués à l'aide du modèle particulaire (appelé théorie particulaire) dès le premier cycle du secondaire. Les énoncés du modèle particulaire sont présentés comme suit dans le manuel de la troisième année secondaire :

- 1- la matière se compose de particules minuscules. [...]. Ces particules sont les atomes ou les molécules.
- 2- Chaque substance pure possède son propre type de particules.
- 3- Les particules s'attirent mutuellement.
- 4- Les particules sont toujours en mouvement.
- 5- Les particules dont la température est plus élevée se déplacent plus vite, en moyenne, que les particules dont la température est plus basse.

De plus, les mélanges sont représentés à partir de particules. Il est noté qu'un mélange homogène correspond à une distribution uniforme des particules. Cependant, les changements chimiques ne sont pas expliqués à l'aide du modèle particulaire. Ils sont plutôt présentés à partir d'exemples concrets « le papier qui se consume et l'essence qui brûle dans le moteur d'une voiture » (Escrivà, Ouellette, Pinsonnault, Zarif, & Khanh-Thanh, 2005, p. 197). Il est également noté que ces changements provoquent l'apparition de nouvelles substances.

Au deuxième cycle, les concepts ci-dessus sont rappelés et les transformations chimiques sont plus détaillées. Elles sont représentées à la fois au moyen d'icônes et d'équations chimiques. Quatre catégories de réactions sont présentées : les réactions de synthèse, de décomposition, d'oxydation et de précipitation (Chartré & Levert, 2008). Il est également question de conservation de matière lors d'une transformation chimique. Concernant les ruptures de liaisons chimiques et la formation de nouvelles, on en fait allusion ailleurs, dans la section qui se rapporte aux formes d'énergie. On définit « l'énergie chimique par une forme d'énergie contenue dans les liens chimiques qui unissent les atomes d'une molécule. Elle se libère lors de réactions chimiques qui brisent ces liens afin de former de nouvelles molécules » (Chartré & Levert, 2008, p. 273).

En plus de concepts précédents, on rappelle la définition d'un modèle scientifique telle que présentée dans le programme de formation i.e. « une représentation visible d'une situation abstraite, difficilement accessible ou carrément cachée » dont les caractéristiques sont : 1- mettre en relation plusieurs observations, 2- simple à comprendre, 3- permet d'expliquer, de représenter et de prédire et 3- perfectible (Chartré & Levert, 2008).

4.2.3.3. Résumé sur le contenu des manuels en lien avec le modèle particulière

La plupart des réalités sont décrites dans les manuels Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. et des Éditions Chenelière Éducation, et ce, dès le premier cycle (tableau 44). Dès ce cycle, les manuels des éditions Chenelière Éducation présentent le modèle particulière (tableau 45) à l'aide de cinq énoncés. Les états de la matière, la compressibilité, les changements d'état et la dissolution sont expliqués à partir de ce modèle (tableau 44).

Tableau 44 : Présentation des réalités en lien avec le modèle particulaire dans les manuels

Réalité	Présentation		Cycle	Éditions
La température	Description	Explication à l'aide de l'agitation des particules	1 ^{er} et 2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Les états de la matière et la compressibilité	Description	Explication <u>implicite</u> à l'aide du modèle particulaire	1 ^{er}	ERPI
	Description	Explication à l'aide du modèle particulaire	1 ^{er}	Chenelière Éducation
Les changements d'état et la conservation des propriétés physiques lors de ces changements	Description	Pas d'explication	1 ^{er}	ERPI
	Description	Explication à l'aide du modèle particulaire	1 ^{er}	Chenelière Éducation
			2 ^e	ERPI
La dissolution	Description	Pas d'explication	1 ^{er}	ERPI
	Description	Explication à l'aide du modèle particulaire	1 ^{er}	Chenelière Éducation
			2 ^e	ERPI
Les mélange homogène et hétérogène	Description	Explication à l'aide de la distribution des particules	1 ^{er} et 2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Les substances pures	Description	Explication à l'aide du concept de la sorte de particules	2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Les éléments et les composés	Description	Explication à l'aide du concept de sorte d'atomes	2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Les changements chimiques	Description	Pas d'explication	1 ^{er}	ERPI et Chenelière Éducation
	Description	Explication à l'aide de liaisons chimiques	2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation

Dans le cas des manuels des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., le modèle particulaire et plus particulièrement son premier énoncé qui concerne le concept de particule n'est pas présenté explicitement dans le contenu du premier cycle (tableau 45). Cependant, le concept

de particule est utilisé dans plusieurs réalités : la température, les trois états de la matière, la propriété de compressibilité, les mélanges hétérogènes et homogènes. En revanche, les changements d'état et les transformations chimiques sont présentées sans avoir recours au concept de particule. En plus des réalités, plusieurs concepts théoriques dont les concepts d'atomes et de molécules (tableau 45) sont présentés au premier cycle dans un chapitre qui s'intitule « l'organisation de la matière », et ce, dans le cas des deux éditions (Chenelière Éducation et Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.).

Tableau 45 : Concepts et modèles théoriques dans les manuels

Les concepts et modèles théoriques	Cycle	Éditions
Les atomes	1 ^{er} et 2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Le modèle de Dalton	1 ^{er}	ERPI et Chenelière Éducation
Les éléments et le tableau périodique	1 ^{er} et 2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Les molécules	1 ^{er} et 2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation
Le modèle particulaire	1 ^{er}	Chenelière Éducation
Le modèle particulaire	2 ^e	ERPI et Chenelière Éducation

Au deuxième cycle, le modèle particulaire est présenté de manière explicite à l'aide de quatre énoncés dans le manuel de la troisième année secondaire des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. et de cinq énoncés dans les éditions Chenelière Éducation. Ce dernier fait référence à la « sorte de particules » qui explique ce qu'est une substance pure, ce qu'est un mélange et, permet de les distinguer.

De plus, dans les manuels des deux éditions, les réalités du premier cycle sont rappelées et complétées. Ainsi, une substance pure est décrite et expliquée à l'aide de la sorte de particules; les éléments et les composés, à l'aide de la « sorte d'atomes » qui composent une particule et les transformations chimiques, à partir des ruptures de liaisons chimiques (tableau 44). Il est

important de remarquer que les concepts tels que : la sorte d'atomes, la liaison chimique ne font pas partie des énoncés du modèle particulaire présentés dans les manuels.

4.2.3.3 L'analyse du contenu en lien avec le modèle particulaire dans les manuels

L'examen du contenu en lien avec le modèle particulaire dans les manuels Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. et Chenelière Éducation montre qu'il n'est pas question de la construction des énoncés du modèle particulaire. Ainsi, la grille d'analyse de la construction du modèle particulaire dans les manuels ne sera pas présentée **puisque aucun critère de cette grille n'est respecté.**

Tableau 46 : Grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans les manuels

Critères d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans les manuels	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
1. Les manuels utilisent le modèle particulaire pour représenter des réalités.			✓
2. Les manuels utilisent le modèle particulaire pour expliquer des réalités.			✓
3. Les manuels utilisent le modèle particulaire pour prédire des réalités.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

L'utilisation du modèle particulaire pour représenter et expliquer fait partie du contenu des manuels. Elle est mentionnée pour cinq réalités : 1- les trois états de la matière, 2- la compressibilité, 3- les changements d'état et 4- la dissolution, 5- la conservation des propriétés caractéristiques lors d'un changement physique (**le premier et deuxième critères sont respectés pour quelques réalités**). Cependant, les manuels ne font pas mention de l'utilisation du modèle particulaire pour prédire des réalités (**le troisième critère n'est pas respecté**).

Tableau 47 : Appréciation du premier et deuxième critères de la grille d'analyse de l'utilisation du modèle particulière dans les manuels

Critère / appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Premier critère		✓		
Deuxième critère		✓		

Toutes les réalités en lien avec le modèle particulière sont décrites et des laboratoires sont prévus à cet effet, et ce, dès le premier cycle du secondaire (**le quatrième critère est respecté pour toutes les réalités**).

Tableau 48 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels

Critère / appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Quatrième critère				✓

Quatre énoncés du modèle particulière sont présentés en troisième année du secondaire dans le cas des Éditions du Nouveau Pédagogique Inc. et cinq dans le cas des éditions Chenelière Éducation. Ainsi, **le cinquième critère est respecté** à partir de **quelques énoncés** dans le cas des Éditions du Nouveau Pédagogique Inc. et à partir de **la majorité des énoncés** dans le cas des éditions de Chenelière Éducation. Par ailleurs, le principe de différenciation entre, d'une part, les réalités et, d'autre part, les énoncés du modèle particulière qui les expliquent est inexistant (**le sixième critère n'est pas respecté**). En effet, on ne précise pas explicitement qu'il faut distinguer les réalités à l'étude des énoncés du modèle particulière qui leur sont associés.

Tableau 49 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels

Critères d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
4. Les manuels décrivent les réalités en lien avec le modèle particulière (la phénoménographie).		✓	✓
5. Les manuels précisent les énoncés du modèle particulière et l'importance de les connaître.			✓ (en partie)
6. Les manuels explicitent le principe de différenciation entre le modèle la réalité qui lui est associé.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 50 : Appréciation du cinquième critère de la grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulière dans les manuels

Critère / appréciation	Peu d'énoncés (1 à 2)	Quelques énoncés (3 à 4)	La majorité des énoncés (5 à 6)	Tous les énoncés de cette étude (7)
Cinquième critère dans ERPI		✓		
Cinquième critère dans Chenelière Éducation			✓	

Tel que relevé précédemment, la description d'un modèle scientifique est rappelée dans les manuels de troisième année secondaire. Ainsi, tous les critères du tableau 51 sont respectés à l'exception du septième critère puisqu'il n'est pas mentionné qu'un modèle est construit.

Tableau 51 : Grille d'analyse de la nature du modèle particulière dans les manuels

Critères d'analyse de la nature du modèle particulière dans les manuels	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
7. Les manuels mentionnent que le modèle particulière est une construction théorique.	✓		
8. Les manuels mentionnent que le modèle particulière a pour fonction de représenter une réalité.			✓
9. Les manuels mentionnent que le modèle particulière a pour fonction de d'expliquer une réalité.			✓
10. Les manuels mentionnent que le modèle particulière a pour fonction de prédire une réalité.			✓
11. Les manuels mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Finalement, tel que souligné précédemment, les manuels mentionnent le recours à des laboratoires pour observer et décrire des réalités **(le douzième critère est respecté)**. Ils utilisent des codes iconiques pour représenter les réalités et soutenir l'apprentissage des élèves **(le treizième critère est respecté)**. Mais, ils ne mentionnent pas les conceptions non scientifiques des élèves ni l'importance de les faire évoluer vers des conceptions scientifiques **(le quatorzième critère n'est pas respecté)**.

Tableau 52 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans les manuels

Critères d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulière dans les manuels	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
12. Les manuels mentionnent le recours aux laboratoires pour observer et décrire une réalité.		✓	✓
13. Les manuels utilisent des codes iconiques pour soutenir la compréhension des élèves.		✓	✓
14. Les manuels tiennent compte des conceptions non scientifiques des élèves.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

4.2.4. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement

Les maisons d'édition ont élaboré des cahiers qui comportent, en plus des activités, des résumés de savoirs. Ces résumés proviennent des contenus de manuels déjà décrits précédemment. Dans le cas des éditions Chenelière Éducation, il y a eu quelques modifications par rapport au contenu des manuels du premier cycle secondaire. Par exemple, il n'est plus question du modèle particulaire dans les cahiers du premier cycle. Ce modèle est présenté dans le contenu de la troisième année du secondaire. De plus, les énoncés, qui sont au nombre de cinq dans les manuels, sont réduits à quatre énoncés dans le cahier d'apprentissage de la troisième année secondaire. En effet, l'énoncé : « chaque substance pure possède son propre type de particule » est retiré.

4.2.4.1. Les activités dans les cahiers des savoirs et d'activités et les guides d'enseignement des éditions du renouveau pédagogique INC. (ERPI)

Cette section présente l'essentiel des activités concernant les réalités en lien avec le modèle particulaire et les énoncés de ce modèle. Elle se termine par une analyse de ces activités.

Les activités au premier cycle

Les trois états de la matière et les changements d'état

1- À partir de photographies, l'élève nomme l'état de la matière qui est sur chaque photographie. 2- À partir d'un schéma qui présente les états de la matière, l'élève le complète en nommant les changements d'état. 3- À partir d'une liste d'exemples et d'une liste de changements d'état, l'élève associe chaque exemple au changement d'état approprié. 4- En se basant sur le modèle particulaire, l'élève explique pourquoi une substance liquide prend la forme du contenant dans lequel elle se trouve. 5- À partir d'une liste d'énoncés concernant l'origine de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, l'origine des nuages et la disparition de la neige, l'élève indique si un énoncé est vrai ou faux. S'il est faux, il le corrige. 6- À partir des diagrammes de changements d'état donnés, l'élève nomme l'état et le changement d'état de

chaque section du diagramme. Il répond aux questions concernant des temps et des températures en se basant sur la lecture des diagrammes en question (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier de savoirs et d'activités, 1^{re} secondaire, 2013).

La température

1- À partir d'illustrations représentant des sphères qui contiennent des particules en mouvement, l'élève classe les sphères par ordre croissant selon l'agitation des particules représentée à l'aide de traits. 2- L'élève reformule le lien entre la température et le degré d'agitation des particules. 3- L'élève indique la température à partir des illustrations de thermomètre. 4- **À la quatrième activité de la page 33, l'élève est amené à comparer les temps de fusion d'un glaçon dans deux situations : la première est qu'on brasse le jus qui contient le glaçon et la deuxième est qu'on laisse reposer le jus et le glaçon qui s'y trouve** (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier de savoirs et d'activités, 1^{re} secondaire, 2013).

Les mélanges et les solutions

Essentiellement, 1- l'élève distingue les mélanges homogènes des mélanges hétérogènes à partir de photographies et d'exemples. 2- Il détermine également le nombre de phases pour chaque exemple ou photographie. Concernant les solutions, 3- à partir d'exemples, l'élève identifie s'il s'agit d'un solvant, d'un soluté, d'une solution, d'un mélange homogène. 4- À partir d'exemples de solution, il identifie le solvant, le soluté pour chaque exemple (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier de savoirs et d'activités, 1^{re} secondaire, 2013).

Les changements physiques

1- L'élève énumère les caractéristiques d'un changement physique. 2- À partir d'une liste de situations et d'une liste de types de changement physique (changement d'état, changement de forme, mélange), l'élève associe chaque situation au type de changement physique approprié. 3- À partir de photographies, l'élève nomme, pour chaque photographie, le type de

changement physique correspondant (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier des savoirs et d'activités, 2e secondaire, 2013).

Les changements chimiques

1- L'élève nomme les indices d'un changement chimique. 2- À partir de photographies de changements chimiques, l'élève identifie l'indice correspondant à la photographie. 3- À partir d'une liste de situations représentant des réactions chimiques et d'une liste d'indices, l'élève associe un indice à chaque situation. 4- L'élève formule ce qu'est une réaction de synthèse, de décomposition, de combustion et d'oxydation. 5- À partir de photographies, l'élève indique le type de réaction chimique et son indice. 6- L'élève complète des réactions en indiquant l'un des réactifs ou l'un des produits ou le type de réaction ou plusieurs informations à la fois (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier des savoirs et d'activités, 2^e secondaire, 2013).

L'organisation de la matière

1- L'élève démontre sa compréhension du concept d'atome, d'élément et des énoncés du modèle de Dalton en répondant par vrai ou faux à des énoncés en lien avec ces concepts. Si l'énoncé est faux, l'élève le corrige en se basant sur la définition d'un atome (une particule indivisible par un moyen chimique), d'un élément (une substance indivisible chimiquement en d'autres substances) et les énoncés du modèle de Dalton. 2- À partir de représentations iconiques ou de formules chimiques ou de noms de molécules, l'élève donne le nombre d'atomes et le nombre de types d'atomes pour chaque molécule. 3- À partir d'une liste, l'élève identifie les atomes et les molécules. 4- L'élève démontre sa compréhension du tableau périodique en nommant ses éléments à partir de symboles et inversement, en déterminant l'état d'un élément, etc. (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier des savoirs et d'activités, 2^e secondaire, 2013).

Les activités en troisième année secondaire

1- L'élève décrit la forme, le volume, la distance entre les particules, les forces d'attraction entre les particules, le mouvement des particules pour chaque état (solide, liquide et gaz) de la matière. 2- À partir de représentations iconiques, l'élève identifie l'état de la matière. 3- À partir de représentations iconiques, l'élève identifie les molécules et les atomes. 4- En se basant sur des définitions faisant intervenir le type de particule et leur composition, l'élève répond par vrai ou faux à des énoncés concernant les mélanges, les mélanges homogènes et hétérogènes, les substances pures, les composés et les éléments. 5- À partir d'échantillon de matière, l'élève identifie les mélanges, les mélanges hétérogènes, les mélanges homogènes, les substances pures, les éléments et les composés. 6- **À la deuxième activité de la page 182, l'élève utilise des énoncés du modèle particulaire pour expliquer des réalités sur les états de la matière** (les détails seront présentés plus loin). 7- À partir d'énoncés du modèle particulaire, l'élève détermine l'état de la matière. 8- L'élève nomme des changements d'état à partir de situations. 9- L'élève nomme l'état initial et l'état final à partir d'une liste de changements d'état. 10- L'élève identifie un changement d'état à partir d'une représentation iconique d'un état initial et d'un état final. 11- L'élève identifie le type de réaction à partir d'énoncé, d'équation chimique ou de représentation iconique. 12- Il reconnaît un fluide compressible d'un fluide incompressible. 13- Il décrit l'espace entre les particules pour les deux types de fluides (Cyr & Verrault, L'essentiel 3, Collection Observatoire, Cahier de savoirs et d'activités, Programme ST et ATS, 2014).

4.2.4.2. Les activités dans les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement des éditions de Chenelière Éducation

Les activités au premier cycle

Les trois états de la matière et les changements d'état

1- L'élève nomme les états de la matière et les décrit. 2- Pour chaque exemple donné de matière, il indique son état. 3- Pour chaque description donnée, il nomme le changement d'état. 4- Pour chaque changement d'état donné, l'élève fournit un exemple. 5- À partir de

diagrammes donnés de changements d'état, l'élève nomme l'état et le changement d'état pour chaque section du diagramme. Il répond aux questions concernant des temps et des températures en se basant sur la lecture des diagrammes. 6- L'élève justifie, à partir de la propriété de la forme indéfinie d'un liquide et définie d'un solide, pourquoi en remplissant un seau avec de l'eau, tout le volume du seau est occupé alors que si on le remplit avec des balles de tennis, il reste de l'espace inoccupé. **7- À la neuvième activité de page 100, l'élève explique pourquoi l'odeur d'une allumette allumée se répand dans toute la maison** (Escrivà, Gagnon, & Richer, Conquêtes, Cahier d'apprentissage, Guide-corrigé, 1^{re} secondaire, 2016).

La température

1- L'élève reformule dans ses mots ce qu'est la température. 2- Il nomme l'instrument qui mesure la température et l'unité de la température. 3- Il décrit le comportement des particules si on les chauffe. 4- À partir d'une liste d'énoncés, l'élève indique si un énoncé est vrai ou faux. Les énoncés concernent le mouvement des particules, d'une part, selon l'état de la matière et, d'autre part, selon la saison (été ou hiver). 5- L'élève indique la température à partir des illustrations de thermomètre. 6- À partir d'illustrations représentant des particules d'air en mouvement, l'élève identifie celle qui correspond aux particules d'air en été et en hiver (Escrivà, Gagnon, & Richer, Conquêtes, Cahier d'apprentissage, Guide-corrigé, 1^{re} secondaire, 2016).

Les mélanges et les solutions

L'élève définit, dans ses mots, ce qu'est 1- un mélange, 2- un mélange homogène, 3- un mélange hétérogène, 4- une solution. 5 - l'élève distingue les mélanges homogènes des mélanges hétérogènes à partir de photographies et d'exemples. 6- À partir d'exemples, il détermine également le nombre de phases pour chaque exemple (Escrivà, Gagnon, & Richer, 2016).

Les changements physiques et chimiques

1- L'élève reformule, dans ses mots, la définition d'un changement physique et d'un changement chimique. 2- À partir de situations, l'élève identifie celles qui correspondent à des changements physiques et celles, à des changements chimiques, et ce, en justifiant ses réponses. 3- Inversement, l'élève donne des exemples de changements physiques et chimiques. 4- L'élève reformule, dans ses mots, pourquoi la plupart des propriétés des substances ne changent pas lors d'un changement physique. 5- L'élève reformule, dans ses mots, les caractéristiques d'un changement chimique i.e. la nature des substances changent, donc leurs propriétés ne sont pas conservées (Escrivà, Gagnon, & Richer, 2016).

Les activités en troisième année du secondaire

1- En se référant au résumé des savoirs, l'élève nomme la limite du modèle particulaire. Il s'agit de l'explication de la radioactivité qui n'est pas accessible au moyen du modèle particulaire. 2- L'élève définit, dans ses mots, ce qu'est une substance pure. 3- Il identifie les éléments, les composés à partir d'une liste de noms ou des représentations iconiques. 4- Il définit, dans ses mots, ce qu'est un mélange, un mélange homogène, un mélange hétérogène. 5- Il les identifie à partir d'une liste de noms ou de photographies. 6- À partir de représentations iconiques, l'élève identifie l'état de la matière. 7- À partir d'une liste d'affirmations faisant références aux énoncés du modèle particulaire, l'élève associe un état de la matière à chaque affirmation. 8- **À la huitième activité de la page 258, l'élève représente l'état final d'une dilution au moyen du modèle particulaire.** 9- **À la neuvième activité de la page 258, l'élève représente une dissolution au moyen du modèle particulaire.** 10- Il identifie des changements physiques à partir de représentations iconiques. 11- Il identifie le type de réactions (décomposition, synthèse, oxydation et précipitation) à partir d'un énoncé ou d'une représentation. 12- Il définit, dans ses mots, les types de réaction. 13- **À la dixième activité de la page 265, il représente l'état final d'une réaction de précipitation au moyen du modèle particulaire.** 14- L'élève reconnaît un fluide compressible et un fluide incompressible. 15- L'élève décrit les forces d'attraction dans les deux types de fluide, à savoir, d'après le corrigé, il existe des forces d'attraction dans les fluides incompressibles, mais celles-ci ne sont pas suffisantes pour lier les

particules. En revanche, il n'existe pas de forces d'attraction dans les fluides compressibles.

16- Dans les activités supplémentaires du guide d'enseignement à la page AS-38, l'élève représente un mélange homogène, un élément et un composé (Escrivà, Gagnon, & Richer, 2018).

4.2.4.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement

L'analyse des activités décrites précédemment montre que ces activités ont essentiellement pour but la mémorisation et la compréhension de **toutes les réalités** en lien avec le modèle particulaire et la connaissance des **quatre énoncés** de ce modèle en troisième année secondaire. Ainsi, **le quatrième critère est respecté dès le premier cycle et le cinquième l'est au deuxième cycle**. Il n'y a pas d'activités qui amènent l'élève à construire les énoncés du modèle particulaire. Ainsi, la grille d'analyse de la construction du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement ne sera pas présentée. Quant aux activités qui permettent l'utilisation du modèle particulaire, celles-ci sont assez rares (tableau 53).

En effet, au premier cycle et pour certaines activités, l'élève doit nommer les états de la matière, les changements d'état, les changements chimiques et leurs indices ce qui revient à une mémorisation. Pour d'autres, l'élève doit démontrer sa compréhension des changements d'état (en les identifiant à partir d'exemples donnés, en complétant les diagrammes qui leur correspondent, en déterminant si certaines affirmations les concernant sont vraies ou fausses et en les corrigeant le cas échéant), du concept de température (en le définissant et en le reliant au mouvement des particules), du mouvement des particules selon le modèle particulaire (en justifiant la forme indéfinie dans le cas d'une substance liquide et définie dans le cas d'une substance solide), des mélanges homogènes et hétérogènes (en les identifiant dans des situations, en les distinguant et en les reliant au nombre de phases), des changements physiques (en formulant leurs caractéristiques i.e. la nature des substances et les propriétés caractéristiques des substances ne changent pas), de ce qu'est un solvant, un soluté et une solution (en les identifier à partir d'exemples donnés), des changements chimiques (en

formulant dans ses propres mots ce qu'est une réaction de synthèse, de décomposition, de combustion et d'oxydation, en identifiant le type de réaction, son indice à partir de photographie, en les distinguant des changements physiques et en formulant leur caractéristique i.e. la nature des réactifs change), des atomes, des molécules (en les identifiant à partir de représentations iconiques), du tableau périodique et ses éléments, du modèle de Dalton.

Au premier cycle, parmi plusieurs activités, nous avons relevé, dans chacun des cahiers des deux éditions, une seule activité qui permet l'utilisation du modèle particulaire. Dans le cahier des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. l'activité consiste à amener l'élève à prédire les temps de fusion d'un glaçon dans deux situations : avec et sans agitation. Cette activité montre que l'élève doit utiliser le modèle particulaire, plus précisément la relation entre la température et l'agitation des particules pour prédire que le temps de fusion diminue si on agite le glaçon (**le troisième critère est respecté au premier cycle pour une seule réalité**). Dans le cahier des éditions Chenelière Éducation, l'activité nécessite que l'élève utilise le modèle particulaire, plus précisément, le mouvement libre des particules d'une substance à l'état gazeux pour expliquer pourquoi l'odeur d'une bougie allumée se répand dans toute la maison (**le deuxième critère est respecté au premier cycle pour une seule réalité**).

Tableau 53 : Grille d'analyse l'utilisation du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critères d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
1. Les activités permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire pour représenter des réalités.	✓ (ERPI)		✓ (Chenelière)
2. Les activités permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire pour expliquer des réalités		✓ (Chenelière)	✓
3. Les activités permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire pour prédire des réalités.		✓ (ERPI)	
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 54 : Appréciation des deux premiers critères de la grille d'analyse l'utilisation du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critère/Appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Premier critère dans Chenelière Éducation		✓		
Deuxième critère dans Chenelière Éducation	✓			
Troisième critère ERPI	✓			

En troisième année du secondaire, l'élève démontre sa compréhension des états de la matière, d'une part, à partir des propriétés macroscopiques comme la forme et le volume et, d'autre part à partir de quatre énoncés du modèle particulaire ou des représentations des particules **(le cinquième critère est respecté)**. Il démontre également sa compréhension des atomes et des molécules (à partir des représentations iconiques comme au premier cycle), des mélanges hétérogènes, des mélanges homogènes, des substances pures, des composés, des éléments (en les définissant, en les identifiant à partir d'échantillons de matière, en affirmant des énoncés vrais et en corrigeant des énoncés faux, et ce, à partir des définitions impliquant le type et la composition des particules), des composés et des éléments (en les distinguant, en les identifiant à partir de symboles, formules chimiques, de noms ou de représentations iconiques), des changements d'état (en les nommant à partir de situations, en nommant l'état initial et final pour chaque changement), de la dissolution (en la nommant à partir de situations), des changements chimiques (en identifiant le type de réaction à partir d'énoncé, d'équation chimique ou de représentation iconique), des fluides (en reconnaissant les fluides compressibles, les fluides incompressibles, et en décrivant l'espace entre les particules dans les deux cas).

Tableau 55 : Grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées au modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critères d'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'activités	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
4. Les activités permettent de connaître des réalités.		✓	✓
5. Les activités permettent de connaître les énoncés du modèle particulaire.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 56 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées au modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critère/Appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Quatrième critère				✓

Tableau 57 : Appréciation du cinquième critère de la grille d'analyse de l'enseignement des connaissances associées au modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critère/Appréciation	Peu d'énoncés (1 à 2)	Quelques énoncés (3 à 4)	La majorité des énoncés (5 à 6)	Tous les énoncés (7)
Cinquième critère		✓		

Dans le cahier de troisième année secondaire des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., une activité a pour objectif l'utilisation du modèle particulaire pour expliquer quatre observations en lien avec les états de la matière (**deuxième critère est respecté au deuxième cycle pour les états de la matière**) : 1- le gaz est invisible, car ses particules sont très espacées; 2- beaucoup de solides sont rigides, car des forces d'attraction retiennent leurs particules; 3- les liquides sont capables de se répandre, car leurs particules sont en mouvement; 4- pour conserver un gaz, il faut qu'il soit dans un contenant fermé, car ces particules ont une liberté de mouvement. Cependant, il n'y a pas d'activités concernant la nature du modèle particulaire.

Ainsi, les critères six à dix inclusivement ne sont pas respectés dans les Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.

Dans le cahier de troisième année secondaire des éditions Chenelière Éducation, des activités ont pour but d'amener l'élève à utiliser le modèle particulaire pour représenter une dissolution, une dilution et une précipitation. De plus, dans les activités supplémentaires du guide d'enseignement de Chenelière Éducation de la troisième année secondaire, une activité qui permet à l'élève de représenter un mélange homogène, un élément et un composé est proposée. Ainsi, les activités du cahier et du guide des éditions Chenelière Éducation permettent à l'élève **de représenter six réalités à l'aide du modèle particulaire : un élément, un composé, un mélange homogène, une dilution, une dissolution et une précipitation. Le premier critère est donc respecté pour quelques réalités.**

Par ailleurs, concernant la nature du modèle particulaire, une activité est en lien avec sa capacité de représenter les particules et ses limites à ne pas pouvoir expliquer certains phénomènes tels que la radioactivité. Ainsi, le septième critère et le dixième sont respectés dans les éditions Chenelière Éducation, mais, ce n'est pas le cas pour le sixième critère, le huitième et le neuvième.

Tableau 58 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critères d'analyse de la nature du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'activités	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
6. Les activités mentionnent que le modèle particulaire est une construction théorique.	✓		
7. Les activités mentionnent que le modèle particulaire a pour fonction de représenter une réalité.	✓(ERPI)		✓(Chenelière)
8. Les activités mentionnent que le modèle particulaire a pour fonction de d'expliquer une réalité.	✓		
9. Les activités mentionnent que le modèle particulaire a pour fonction de prédire une réalité ou un phénomène.	✓		
10. Les activités mentionnent l'aspect perfectible d'un modèle.	✓(ERPI)		✓ Chenelière)
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Finalement, pour permettre à l'élève d'observer et de décrire des réalités, des laboratoires sont prévus (**le onzième critère est respecté**). De plus, les activités utilisent des représentations iconiques pour soutenir la compréhension de l'élève (**le douzième critère est respecté**). Cependant, les activités ne tiennent pas compte des conceptions non scientifiques des élèves (**le treizième critère n'est pas respecté**).

Tableau 59 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'activités

Critères d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'activités	Non	Oui 1 ^{er} cycle	Oui 2 ^e cycle
11. Les activités proposent des laboratoires pour observer et décrire une réalité.		✓	✓
12. Les activités utilisent des codes iconiques pour soutenir la compréhension des élèves.			✓
13. Les activités tiennent compte des conceptions non scientifiques des élèves.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

4.2.5. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les épreuves

Cette section a pour but d'analyser le contenu en lien avec le modèle particulaire dans les épreuves du volet théorique conçues à partir de l'année scolaire 2012 tel que précisé dans le chapitre précédent. Cette section présente l'essentiel du contenu de l'univers matériel des épreuves de la deuxième année et de la troisième année secondaire fournies par le Centre de services scolaire de Montréal (ex-Commission scolaire de Montréal) et celui des épreuves uniques de la quatrième année secondaire fournies par le Ministère de l'Éducation. Ensuite, une analyse de ces contenus est effectuée au moyen des grilles élaborées au troisième chapitre.

4.2.5.1. Le contenu des épreuves du volet théorique de la 2^e année du 1^{er} cycle

Le nombre de questions à choix de réponse est noté N_A et celui à réponse construite, N_B . D'après le tableau 60, la pondération de l'univers matériel est de 28 %, 32 % et 23,3 % en 2012, 2013 et 2016 respectivement. Ces pondérations montrent que plus du quart des épreuves est consacré à l'univers matériel. Ce dernier est donc bien représenté dans les épreuves.

Tableau 60 : Épreuves théoriques de la deuxième année secondaire

	Univers matériel	Univers vivant	Terre et espace	Technologie
2012				
N_A	2	5	1	2
N_B	5	3	3	4
Pondération	28 %	32 %	16 %	24 %
2013, 2014, 2015				
N_A	4	2	1	3
N_B	4	4	3	4
Pondération	32 %	24 %	16 %	28 %
2016, 2017, 2018, 2019				
N_A	3	3	2	2
N_B	4	5	5	6
Pondération	23,3 %	26,7 %	23,3 %	26,7 %

Le contenu en lien avec le modèle particulière de l'épreuve théorique de l'année 2012

Deux questions sont à choix de réponse et cinq à réponse construite. Par souci de concision, nous éviterons d'écrire les questions telles quelles. Ainsi, ci-dessous leur reformulation.

Questions à choix de réponse

1- À partir du chauffage de la glace jusqu'à ce qu'elle se transforme en vapeur d'eau, l'élève doit reconnaître la séquence des changements de phases impliquée parmi une liste de séquences. 2- À partir d'un mélange de trois ingrédients, l'élève doit reconnaître la séquence appropriée des procédés de séparation de ce mélange parmi une liste de séquences.

Questions à réponse construite

3- À partir de certaines propriétés de substances, l'élève doit reconnaître celles qui sont caractéristiques et celles qui ne le sont pas. 4- À partir de la représentation iconique (des boules et des tiges) d'une molécule diatomique X, l'élève doit justifier pourquoi il s'agit d'une molécule. Il doit également reconnaître en justifiant sa réponse si la substance X est un composé ou un élément. 5- À partir d'une illustration d'un montage avant et après l'électrolyse, l'élève doit reconnaître s'il s'agit d'une transformation physique ou chimique en justifiant sa réponse (le schéma du montage après l'électrolyse montre des bulles, donc un dégagement de gaz qui est un indice des transformations chimiques). Il doit également expliquer si l'eau a les mêmes propriétés que les éléments qui la composent. 6- À partir d'une illustration d'un montage avant et après une transformation chimique, l'élève doit expliquer le changement de volume du ballon qui couvre la bouteille où a lieu la réaction chimique. 7- À partir de la masse d'un contenant vide et du même contenant rempli de nourriture, l'élève doit calculer la masse de la nourriture.

L'examen des questions précédentes montre que l'élève doit démontrer la compréhension de trois réalités en lien avec le modèle particulaire : 1- les changements d'état en reconnaissant la séquence qui permet de passer de la glace à la vapeur d'eau (première question); 2- les changements physiques et 3- les changements chimiques en les distinguant (cinquième question et sixième). Il doit également démontrer sa compréhension du concept de molécule, ce qui est en lien avec le septième énoncé du modèle particulaire d'après de Vos et Verdonk, 1996. En effet, l'élève doit reconnaître qu'une molécule est composée d'atomes reliés chimiquement, et ce, à partir d'une représentation iconique (quatrième question). La

deuxième question, la troisième et la septième ne sont pas vraiment en lien avec le modèle particulaire, elles portent respectivement sur les techniques de séparations physiques, les propriétés caractéristiques et non caractéristiques et le calcul de masse.

Le contenu en lien avec le modèle particulaire de l'épreuve théorique des années 2013, 2014 et 2015

L'épreuve de l'année 2013, 2014 et 2015⁹ comporte huit questions sur l'univers matériel dont quatre questions à choix de réponse et quatre autres à réponse construite (tableau 60).

Questions à choix de réponse

1- À partir d'objets et de plusieurs unités de volume, l'élève doit choisir l'unité appropriée correspondant à chaque objet. 2- À partir de relations entre la température et le degré d'agitation des particules, l'élève doit reconnaître la bonne relation (i.e. lorsque la température augmente, le degré d'agitation des particules augmente). 3- Parmi des mélanges donnés, l'élève doit reconnaître ceux qui sont homogènes. 4- À partir d'une représentation iconique (au moyen de boules), l'élève doit reconnaître une réaction chimique donnée.

Question à réponse construite

5- À partir d'un diagramme qui représente les changements de phases, l'élève doit reconnaître et nommer les différents changements. 6- À partir des étapes d'une préparation d'un gâteau, l'élève doit reconnaître les changements et, le cas échéant, distinguer les changements chimiques des changements physiques. 7- À partir d'une mise en situation, l'élève doit réfuter une hypothèse (la perte de matière) en s'appuyant sur le principe de la conservation de la matière. Compte tenu de la situation, il doit également élaborer le plan d'une expérimentation qui permet de mettre à l'épreuve le principe en question. 8- À partir d'une mise en situation impliquant un mélange, l'élève doit décrire comment séparer un mélange au moyen de deux techniques.

⁹ En général, une épreuve officielle est produite et utilisée par le Centre de services scolaire de Montréal pour une période de trois années.

La première question et la huitième ne sont pas vraiment en lien avec le modèle particulaire. La première question concerne les unités de volume et la huitième, les techniques de séparation physiques. Cependant, à la troisième question, la cinquième, la sixième et la septième, l'élève doit démontrer sa compréhension respectivement des mélanges, des changements d'état, des changements physiques et chimiques et du principe de la conservation de masse. Toutes ses réalités sont en lien avec le modèle particulaire comme il en a été question précédemment. Par ailleurs, la deuxième question et la quatrième se rapportent aux énoncés du modèle particulaire. La deuxième question concerne la relation entre la température et l'agitation des particules i.e. le deuxième énoncé et la quatrième question est à propos d'une réaction chimique. Pour cette dernière question, l'élève doit démontrer la compréhension du septième énoncé du modèle particulaire à partir d'une représentation iconique d'une réaction chimique.

Le contenu en lien avec le modèle particulaire de l'épreuve théorique des années 2016, 2017, 2018 et 2019

L'épreuve théorique des années 2016, 2017, 2018 et 2019 comporte sept questions sur l'univers matériel (tableau 60). Trois questions à choix de réponse et quatre autres à réponse construite.

Questions à choix de réponse

1- À partir d'une représentation en boules de deux changements de phases, l'élève doit choisir les énoncés appropriés impliquant la variation de la température, l'agitation des particules et les noms des changements impliqués. 2- À partir d'énoncés impliquant des indices, l'élève doit reconnaître l'indice qui illustre une transformation chimique. 3- Question semblable à la 2^e question à choix de réponse de l'épreuve 2012 (procédés de séparation).

Questions à réponse construite

4- L'élève doit décrire comment procéder pour identifier l'eau pure parmi plusieurs solutions incolores et inodore. 5- L'élève doit décrire le phénomène de dilatation thermique, lequel

permet le fonctionnement d'un thermomètre. 6- À partir de formules chimiques, l'élève doit indiquer pour chacune des formules si c'est un élément, un atome ou une molécule. L'énoncé précise que plus d'une réponse peut correspondre à une formule chimique. 7- À partir de la masse des réactifs qui est différente de celle des produits, l'élève doit identifier quel principe n'est pas respecté et pourquoi.

L'élève doit démontrer sa compréhension des changements d'état en les identifiant et en les nommant à partir de représentations iconiques (première question). Il doit également identifier les atomes, les molécules et les éléments à partir de formules chimiques ce qui démontre sa compréhension par rapport à ces concepts (sixième question).

Tableau 61 : Résumé sur la nature des questions en lien avec le modèle particulaire dans les épreuves du premier cycle

Les connaissances à évaluer	Épreuves au premier cycle entre 2012 et 2019
Les connaissances des réalités	L'élève doit démontrer sa compréhension : 1- des changements d'état, 2- des changements physiques, 3- des changements chimiques, 4- de la conservation de la matière, 5- des mélanges, 6- des mélanges homogènes.
Les connaissances en lien avec les énoncés du MP.	L'élève doit démontrer sa compréhension : 1- de la relation entre la température et l'agitation des particule (en lien avec le 2 ^e énoncé du MP), 2- d'un atome, 3- d'une molécule et 4- d'un élément en les identifiant à partir de représentations, ce qui est en lien avec la composition d'une particule i.e. le 7 ^e énoncé du MP.

4.2.5.2. Le contenu des épreuves du volet théorique de la 1^{re} année du 2^e cycle

D'après le tableau 62, la pondération de l'univers matériel est de 17,7 %, 28 %, 32 % et 24 % en 2012, 2013, 2016 et 2019 respectivement. À l'exception de l'année 2012 où seulement environ 18% des questions étaient destinées à l'univers matériel, ce dernier est bien représenté dans les épreuves.

Tableau 62 : Épreuves théoriques de la troisième année secondaire

	Univers matériel	Univers vivant	Terre et espace	Technologie
2012				
N _A	0	3	1	2
N _B	3	4	1	3
Pondération	17,7 %	41,2 %	11,8 %	29,4 %
2013, 2014 et 2015				
N _A	3	9	0	1
N _B et N _C	4	3	1	4
Pondération	28 %	48 %	4 %	20 %
2016, 2017 et 2018				
N _A	3	7	1	1
N _B et N _C	5	3	1	4
Pondération	32 %	40 %	8 %	20 %
2019				
N _A	3	2	0	2
N _B et N _C	3	8	1	6
Pondération	24 %	40 %	4 %	32 %

Le contenu en lien avec le modèle particulière de l'épreuve théorique de l'année 2012

Dans l'univers matériel de l'épreuve théorique de l'année 2012, aucune question n'est à choix de réponse et trois sont à réponse construite (tableau 62).

Questions à réponse construite

1- L'élève doit distinguer une digestion mécanique d'une digestion chimique. 2- L'élève doit calculer la masse d'un soluté à partir de la concentration et du volume de la solution. 3- La troisième question est à propos des ondes.

Dans la première question, qui concerne les transformations, l'élève doit démontrer sa compréhension des transformations physiques et chimiques en distinguant la digestion mécanique de la digestion chimique. La deuxième question est en lien avec les solutions. L'élève doit utiliser un formalisme mathématique pour calculer la masse d'un soluté à partir de la concentration et du volume de la solution.

Le contenu en lien avec le modèle particulière de l'épreuve théorique des années 2013, 2014 et 2015

L'épreuve théorique de l'année 2013 comporte trois questions à choix de réponse et quatre questions à réponse construites dans l'univers matériel (tableau 62).

Questions à choix de réponse

1- À partir de la masse d'une substance inconnue et de son volume, l'élève doit identifier la substance inconnue parmi une liste de substances. Un tableau de référence de masse volumique de substances pures est fourni. 2- À partir de plusieurs représentations au moyen de boules, l'élève doit identifier la représentation qui correspond à une réaction de synthèse. 3- Lors d'une dilution, l'élève doit choisir la nouvelle concentration parmi une liste de concentrations.

Questions à réponse construite

4- À partir d'une représentation, au moyen de boules, d'une bouteille de plongée avant son remplissage, **l'élève doit représenter cette bouteille après le remplissage. Il doit également prédire l'effet du remplissage sur la pression dans la bouteille en le justifiant.** 5- L'élève doit

déterminer des valeurs à partir d'un graphique. La sixième et la septième question concernent les ondes.

En examinant les questions précédentes, trois constats peuvent être relevés en lien avec le modèle particulaire : 1- la compréhension d'une réaction de synthèse en l'identifiant à partir d'une représentation iconique (deuxième question); 2- l'utilisation du modèle particulaire pour représenter une bouteille après le remplissage (quatrième question); 3- l'utilisation du modèle particulaire pour prédire l'effet du remplissage d'une bouteille sur la pression à la quatrième question. D'autres questions pour lesquelles l'élève doit utiliser le formalisme mathématique pour calculer la masse volumique d'une substance en vue de l'identifier (la première question) et la concentration d'une solution après dilution (la troisième question).

Le contenu en lien avec le modèle particulaire de l'épreuve théorique des années 2016, 2017 et 2018

L'épreuve théorique des années 2016, 2017 et 2018 comporte trois questions à choix de réponse et cinq questions à réponse construites dans l'univers matériel (tableau 62).

Questions à choix de réponse

1- L'élève doit choisir un métal en considérant le point de fusion. 2- L'élève doit choisir la substance inconnue parmi une liste de substances en comparant ses propriétés à celles de plusieurs substances données dans un tableau de référence. 3- L'élève doit reconnaître une transformation physique parmi une liste de transformations qui se produisent dans le corps.

Questions à réponse construite

4- L'élève doit expliquer ce qui se passe à la pression et au volume d'air lors d'une inspiration. 5- À partir d'une concentration et d'un volume de solution, l'élève doit déterminer la masse du soluté. Il doit également calculer une nouvelle concentration après dilution. 6- L'élève doit expliquer différentes transformations d'énergie. **7- L'élève doit expliquer la compressibilité**

et l'incompressibilité des fluides au moyen du modèle particulaire. 8- Cette question concerne les ondes.

D'après les questions précédentes, nous constatons que deux questions sont en lien avec le modèle particulaire : la troisième question où l'élève doit démontrer sa compréhension des transformations physiques et la septième question où **l'élève doit utiliser le modèle particulaire pour expliquer la propriété de compressibilité des fluides.** Comme dans les épreuves antérieures, les autres questions concernent la compréhension des propriétés caractéristiques et leur rôle qui est de permettre l'identification des substances inconnues, l'utilisation du formalisme mathématique pour calculer la masse d'un soluté et les transformations d'énergie.

Le contenu en lien avec le modèle particulaire de l'épreuve théorique de l'année 2019

L'épreuve théorique de l'année 2019 comporte trois questions à choix de réponse et trois questions à réponse construite dans l'univers matériel (tableau 62). Parmi les questions à choix de réponse, deux concernent les ondes.

Questions à choix de réponse

1- À partir d'une représentation en boules de plusieurs substances, l'élève doit identifier les substances pures.

Questions à réponse construite

2- L'élève doit expliquer la circulation sanguine au moyen du concept de pression sanguine et de la propriété d'incompressibilité du sang. 3- L'élève doit calculer la masse volumique d'une substance à partir de sa masse et de son volume. Connaissant la masse volumique de trois autres substances, l'élève doit identifier la position de chaque substance dans une colonne de densité. 4- L'élève doit calculer une concentration à partir de la masse du soluté et du volume du solvant. Il doit également déterminer la nouvelle concentration après dilution.

D'après les questions précédentes, une seule question (la première) est en lien avec le modèle particulaire. L'élève doit démontrer sa compréhension d'une substance pure en l'identifiant à partir d'une représentation iconique.

Tableau 63 : Résumé sur la nature des questions en lien avec le modèle particulaire dans les épreuves de la troisième année du secondaire

La nature des questions	Épreuves en troisième année secondaire entre 2012 et 2019
La connaissance des réalités	1- La compréhension des transformations physiques et chimiques, 2- la compréhension de la digestion mécanique et de la digestion chimique en les distinguant.
La connaissance en lien avec les énoncés du MP	1- La compréhension du 7 ^e énoncé du MP en identifiant une réaction de synthèse à partir de sa représentation iconique, 2- la compréhension du 7 ^e énoncé du MP en identifiant une substance pure à partir de sa représentation iconique.
L'utilisation du modèle particulaire	1- L'utilisation du MP pour représenter une bouteille après un remplissage, 2- l'utilisation du modèle particulaire pour prédire l'effet d'un remplissage d'une bouteille sur la pression, 3- l'utilisation du MP pour expliquer la compressibilité des fluides.

4.2.5.3. Le contenu en lien avec le modèle particulaire des épreuves uniques de la 2^e année du 2^e cycle

Les épreuves uniques comprennent trois sections, la section A inclut 15 questions à choix de réponse, la section B contient cinq questions à réponse construite et la section C comporte cinq questions d'analyse technologique. Le nombre de questions par univers ainsi que les pondérations de chaque univers sont reportés dans les tableaux 64 et 65. L'univers matériel est bien représenté dans les épreuves uniques puisque sa pondération varie de 48 % à 56 %.

Tableau 64 : Épreuves uniques de la 4e année secondaire entre 2012 et 2015

Année	Nombre de questions par section et pondération	Univers matériel	Univers vivant	Terre et espace	Technologie
2012	N _A	9	2	3	1
	N _B et N _C	4	1	1	4
	Pondération	52 %	12 %	16 %	20 %
2013	N _A	11	0	3	1
	N _B et N _C	3	1	1	5
	Pondération	56 %	4 %	16 %	24 %
2014	N _A	10	0	3	2
	N _B et N _C	3	1	1	5
	Pondération	52 %	4 %	16 %	28 %
2015	N _A	9	0	4	2
	N _B et N _C	3	0	1	6
	Pondération	48 %	0	20 %	32 %

Tableau 65 : Épreuves uniques de la 4^e année secondaire entre 2016 et 2019

Année	Nombre de questions par section et pondération	Univers matériel	Univers vivant	Terre et espace	Technologie
2016	N _A	11	0	3	1
	N _B et N _C	3	0	1	6
	Pondération	56 %	0	16 %	28 %
2017	N _A	11	0	3	1
	N _B et N _C	3	0	1	6
	Pondération	56 %	0	16 %	28 %
2018	N _A	11	0	4	0
	N _B et N _C	3	0	1	6
	Pondération	56 %	0	20 %	24 %
2019	N _A	10	0	4	1
	N _B et N _C	3	0	1	6
	Pondération	52 %	0	20 %	28 %

Rappelons que les questions qui se rapportent à l'énergie et ses manifestations ainsi qu'à l'électricité et au magnétisme ont été retirées de notre analyse (tableau 66) bien qu'elles aient été comptabilisées dans l'univers matériel. Ce retrait est dû au fait que le modèle particulaire ne s'applique pas vraiment à ces réalités.

Tableau 66 : Nombre de questions retirées par année scolaire

Année	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nombre de questions retirées	5	5	6	5	6	6	7	6

Comme pour les épreuves précédentes, nous avons reformulé les questions des épreuves.

Questions à choix de réponse

1- Parmi une liste de composés (bloc de sel, eau distillée, sucre et le vinaigre), l'élève doit reconnaître ceux qui permettent le passage d'un courant. 2- L'élève doit reconnaître combien de fois une solution est plus acide ou plus basique qu'une autre à partir de leur pH respectif. 3- Inversement, l'élève doit choisir la valeur du pH d'une solution sachant qu'elle est X fois plus acide ou basique qu'une autre solution dont le pH est donné. 4- L'élève doit reconnaître un milieu alcalin à partir du pH. 5- L'élève doit reconnaître le caractère acidobasique d'une solution à partir de la couleur qu'elle prend en présence d'un indicateur dont la couleur est connue en fonction du pH. 6- L'élève doit reconnaître certaines transformations chimiques comme la photosynthèse, la combustion, la respiration, la décomposition, la neutralisation acidobasique à partir d'équations chimiques. 7- L'élève doit reconnaître si une équation chimique est balancée. 8- L'élève doit choisir les coefficients appropriés pour qu'une équation chimique soit balancée. 9- Parmi une liste de composés, l'élève doit reconnaître le sel qui est produit lors d'une réaction de neutralisation acidobasique. 10- Connaissant les masses impliquées dans une transformation chimique, l'élève doit reconnaître la masse inconnue. 11- Lors d'une combustion, reconnaître les éléments du triangle de feu. 12- À partir d'une liste d'actions, l'élève doit associer une action à chacun des éléments du triangle de feu. 13- L'élève doit connaître que plus une eau est dense, moins elle flotte. 14- L'élève doit connaître que l'eau salée est plus dense que l'eau distillée. 15- À partir d'informations fournies, l'élève doit reconnaître celles qu'on peut tirer du noyau (nombre de charge positives, par exemple) et celles qu'on peut avoir à partir de l'extérieur du noyau (le nombre de couches électroniques, le nombre d'électrons de valence, etc.) selon le modèle de Rutherford-Bohr. 16- À partir de plusieurs notations de Lewis, l'élève doit reconnaître celle qui représente un atome de manière adéquate. 17- L'élève doit connaître le nom de certaines familles (alcalin, halogène, etc.) et il doit identifier les éléments qui appartiennent à ces familles. 18- L'élève doit reconnaître, pour un élément donné, sa famille et sa période (le tableau périodique est fourni lors de l'épreuve).

19- L'élève doit reconnaître des éléments qui appartiennent à la même famille ou à la même période. 20- À partir d'une équation chimique, l'élève doit reconnaître la représentation iconique correspondante.

Questions à réponse construite

21- L'élève doit calculer une concentration en ppm à partir de la masse d'un soluté et du volume de la solution. 22- L'élève doit calculer la masse d'un soluté à partir de la concentration et du volume de la solution. 23- À partir d'une équation chimique, l'élève doit calculer la masse inconnue d'un composé à partir des masses données. 24- À partir de données, l'élève doit placer des éléments chimiques dans le tableau périodique. 25- L'élève doit faire correspondre des caractéristiques (sa période, sa famille, son nombre de proton, etc.) à un atome ou à un ion lequel est représenté soit en symbole, soit à partir de son nom, soit à partir du modèle de Rutherford-Bohr.

L'examen des questions précédentes montre que l'élève doit comprendre le modèle de Rutherford-Bohr qui est le huitième énoncé du modèle particulaire tel que nous l'avons vu au deuxième chapitre. En effet, pour répondre à la question 15, l'élève doit savoir qu'un atome est constitué d'un noyau chargé positivement autour duquel gravitent des électrons chargés négativement. L'élève doit également comprendre les représentations fournies par le modèle de Rutherford-Bohr des atomes et des ions et les informations nécessaires comme la famille, la période, le nombre d'électrons, le nombre d'électrons de valence, etc.

4.2.5.4. L'analyse du contenu en lien avec le modèle particulaire dans les épreuves théoriques

Le contenu en lien avec le modèle particulaire dans les épreuves du volet théorique montre que, lors de l'épreuve des années 2013, 2014 et 2015, l'élève doit démontrer l'utilisation du modèle particulaire en représentant une bouteille après remplissage et en prédisant l'effet de ce remplissage sur la pression. Lors de l'épreuve des années 2016, 2017 et 2018, l'élève doit expliquer à l'aide du modèle particulaire la compressibilité des fluides. Ainsi, lors de ces deux

épreuves, l'élève a eu l'occasion d'utiliser le modèle particulaire pour représenter, expliquer et prédire. Comme la représentation, l'explication et la prédiction concernent chacune une seule réalité, le premier critère, le deuxième et le troisième sont respectés pour peu de réalités.

Tableau 67 : Grille d'analyse l'utilisation du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critères d'analyse de l'utilisation du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
1. Les épreuves permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire pour représenter des réalités.			✓
2. Les épreuves permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire pour expliquer des réalités			✓
3. Les épreuves permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire pour prédire des réalités.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 68 : Appréciation des trois premiers critères de la grille d'analyse l'utilisation du modèle particulaire dans les cahiers d'activités et les guides d'enseignement

Critère/Appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Premier critère	✓			
Deuxième critère	✓			
Troisième critère	✓			

L'examen des épreuves montre que l'élève doit démontrer sa compréhension de quelques réalités : les changements d'états, les changements physiques, les changements chimiques, les mélanges et les mélanges hétérogènes. Il en est de même pour les trois énoncés du modèle particulaire : le deuxième qui postule que la relation entre la température et l'agitation des particules; le septième qui permet, entre autres, la représentation des atomes, des molécules et des réactions chimiques et le huitième qui est en lien avec la structure de l'atome et, par suite, le modèle de Rutherford-Bohr que l'élève doit comprendre pour répondre aux questions

des épreuves uniques. Ainsi, le quatrième critère est respecté pour quelques réalités et le cinquième critère pour peu d'énoncés si on ne compte pas le huitième énoncé puisqu'il a été écarté de cette étude (rappelons que le huitième énoncé concerne un autre modèle, celui du modèle atomique).

Tableau 69 : Grille d'analyse de l'évaluation des connaissances associées au modèle particulaire dans les épreuves

Critères d'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'activités	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
4. Les épreuves permettent de connaître des réalités.		✓	✓
5. Les épreuves permettent de connaître les énoncés du modèle particulaire.			✓
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

Tableau 70 : Appréciation du quatrième critère de la grille d'analyse de l'évaluation des connaissances associées au modèle particulaire dans les épreuves

Critère/Appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Quatrième critère		✓		

Tableau 71 : Appréciation du cinquième critère de la grille d'analyse de l'évaluation des connaissances associées au modèle particulaire dans les épreuves

Critère/Appréciation	Peu d'énoncés (1 à 2)	Quelques énoncés (3 à 4)	La majorité des énoncés (5 à 6)	Tous les énoncés (7)
Cinquième critère	✓			

Finalement, il n'est nulle part question de la nature du modèle particulaire, ni de son rôle de manière explicite, ni de ses limites, ni de ses qualités, ni de son caractère construit. Les critères du tableau 72 ne sont donc pas respectés dans les épreuves.

Tableau 72 : Grille d'analyse de l'évaluation de la nature du modèle particulaire dans les épreuves

Critères d'analyse de la nature du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'activités	Non	Oui 1^{er} cycle	Oui 2^e cycle
6. Les épreuves mentionnent que le modèle particulaire est une construction théorique.	✓		
7. Les épreuves mentionnent que le modèle particulaire a pour fonction de représenter une réalité.	✓		
8. Les épreuves mentionnent que le modèle particulaire a pour fonction de d'expliquer une réalité.	✓		
9. Les épreuves mentionnent que le modèle particulaire a pour fonction de prédire une réalité ou un phénomène.	✓		
10. Les épreuves mentionnent l'aspect perfectible d'un modèle.	✓		
Légende : Non : Critère non respecté ; Oui 1 ^{er} cycle : Critère respecté au 1 ^{er} cycle; Oui 2 ^e cycle : Critère respecté au 2 ^e cycle.			

4.3. L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire auprès des enseignants

Des entretiens avec six enseignants en science et technologie ont été entrepris pour analyser l'enseignement du modèle particulaire. Tel que mentionné au troisième chapitre, tous ces enseignants ont, dans leur tâche, l'enseignement de la science et de la technologie (ST) au troisième niveau du secondaire i.e. le niveau où le modèle particulaire est prescrit. De plus, ils connaissent également le programme de la science et de la technologie du premier cycle, car ils l'ont déjà enseigné. Cette section présente, puis analyse les réponses aux questions (présentées au troisième chapitre) des enseignants appelés A, B, C, D, E et F.

Il est important de signaler que tous les participants étaient surpris d'apprendre que le sujet de la recherche portait sur le modèle particulaire. Ils ont tous questionné la chercheuse sur la pertinence de cette étude. En effet, d'après eux, ce concept n'était ni important, ni suffisamment consistant pour faire l'objet d'une thèse. La chercheuse a exprimé à chaque participant qu'elle était très ouverte à répondre aux questions après l'entretien pour éviter que ses réponses soient un biais aux réponses des participants.

La première question : quel matériel didactique utilisez-vous ?

Les enseignants A, B, C et D utilisent le matériel des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. en particulier le cahier des savoirs et d'activités (Cyr & Verrault, L'essentiel 3, Collection Observatoire, Cahier de savoirs et d'activités, Programme ST et ATS, 2014). Les enseignants E et F utilisent le matériel des éditions Chenelière Éducation, l'enseignant E utilise essentiellement le cahier d'apprentissage de la troisième année secondaire ADN (Escriva, Gagnon, & Richer, 2017). L'enseignant F utilise le manuel (Chartré & Levert, Synergie, 2008) et le guide d'enseignement de la troisième année secondaire Synergie (Chartré & Levert, 2011). Le milieu socio-économique de ses élèves est défavorisé, l'école a préféré ne pas demander aux parents d'acheter un cahier d'apprentissage. L'enseignant prépare un cahier appelé cahier-maison à partir des documents reproductibles du guide d'enseignement. Dans ce cahier, il y a des fiches de savoirs non complétées, des thématiques, des laboratoires, des ateliers en technologie et des fiches de pratique pour l'apprentissage du formalisme essentiellement.

Tableau 73 : Matériel didactique des participants et des élèves

Participants	A	B	C	D	E	F
Matériel utilisé par l'enseignant	- L'essentiel 3, corrigé du cahier de savoirs et d'activité - Observatoire 3, Manuel de l'élève				- ADN 2 ^e Édition Guide d'enseignement	- Synergie Guide d'enseignement - Synergie Manuel de l'élève
Matériel utilisé par l'élève	L'essentiel 3, cahier de savoirs et d'activité				- ADN 2 ^e Édition Cahier d'apprentissage Savoirs et activités	Cahier maison
L'édition du matériel utilisé	ERPI				Chenelière Éducation	Chenelière Éducation

La deuxième question : comment procédez-vous pour enseigner le modèle particulaire ?

L'enseignant A :

Je n'enseigne pas ce modèle, car les élèves ont déjà vu les trois états de la matière en première année du secondaire et ils ont également fait le laboratoire sur les changements d'état de la glace : ils ont observé le passage de la glace à l'eau liquide, puis à la vapeur d'eau lorsque la température augmente. Les élèves ont déjà appris l'arrangement et le mouvement des particules dans chaque état de la matière. Alors, moi et mes collègues de secondaire 3, nous avons décidé de consacrer plus de temps à la biologie, car il y a beaucoup de choses à voir en biologie.

Comme cet enseignant accorde plus de temps à l'enseignement du programme de l'univers vivant à cause de sa densité, nous avons cherché à comprendre ce qui est enseigné dans l'univers matériel. D'où la question supplémentaire : **quels concepts de l'univers matériel enseignez-vous ?**

L'enseignant A :

Je traite les propriétés des solutions, le calcul des concentrations, la solubilité. Les élèves ont besoin de ces concepts, car en secondaire 4, ils doivent calculer la concentration en p.p.m. J'enseigne aussi l'organisation de la matière (les atomes, les molécules, les composés, etc.) et les transformations chimiques. Les élèves en ont besoin en secondaire 4.

Tous les autres participants ont affirmé enseigner le modèle particulaire. Ils commencent tous par une mise en situation, lesquelles sont différentes d'un participant à l'autre comme le montrent les verbatim suivants :

L'enseignant B :

Pour enseigner le modèle particulaire, je commence par rappeler le concept d'atome en effritant la craie jusqu'à obtenir une poudre que je n'arrive plus à diviser. Je leur explique ainsi que l'atome est la plus petite particule qu'on ne peut plus diviser. Après, cette modélisation, j'y ajoute la concrétisation de l'atome en le représentant par des boules qui présentent des trous. Puis, j'ajoute les bâtonnets pour représenter les liaisons chimiques qui conduisent à visualiser les molécules et à les distinguer de l'atome.

L'enseignante C :

Pour enseigner le modèle particulaire, je fais le lien avec l'univers vivant en considérant le microscope. Je demande aux élèves de quoi un microscope est formé. Je pose la question pour que les élèves parlent de la matière. Ensuite, je prends l'exemple d'un couturier qui se base sur un modèle pour confectionner des habits et j'explique aux élèves que les scientifiques également utilisent des modèles. Par exemple, pour expliquer la matière, ils utilisent le modèle particulaire. J'explique que la matière est composée de particules qu'on ne peut pas voir parce qu'elles sont très petites.

L'enseignant D :

Je commence par demander aux élèves de me rappeler tout ce qu'ils savent sur les trois états de la matière. J'ai remarqué que les élèves ne se souviennent pas de l'arrangement et du mouvement des particules dans les trois états de la matière. Alors, j'explique aux élèves qu'à l'état solide, les particules sont attachées entre elles. C'est très difficile pour elles de bouger. À l'état liquide, elles sont un peu éloignées, elles peuvent bouger. À l'état gazeux, il n'y a presque plus de liens, donc les particules bougent plus.

L'enseignante E :

J'ai mis dans une boîte une bille et un jeton du jeu Bingo. J'ai scellé la boîte. Ensuite, j'ai demandé aux élèves d'essayer de deviner ce qui s'y trouve. Les élèves ont brassé la boîte, ils ont fait attention au son que les objets font et leur contact avec les parois de la boîte. Ils se sont rendu compte qu'un objet roule, alors que l'autre glisse. Bien sûr, je ne leur ai pas dit ce qu'il y avait dans la boîte. Ils ont beaucoup insisté pour que j'ouvre la boîte. Même après des mois, ils voulaient ouvrir la boîte. Mais, je n'ai pas accepté. Je voulais qu'ils apprennent que certaines choses comme les particules sont invisibles, mais on essaye malgré tout de comprendre comment elles fonctionnent. C'est comme ça que j'introduis le modèle particulaire.

L'enseignant F

Je commence par demander aux élèves de me rappeler les états de la matière. Les élèves connaissent tous les trois états. Je leur demande de décrire leurs formes et leurs volumes, là non plus, il n'y a pas de problème, ils sont capables de répondre et de dire, par exemple, que le solide a une forme et un volume déterminés, etc. Par contre, ils ont oublié comment les particules bougent dans un solide, ils ne se souviennent pas des forces entre les particules. Alors, je rappelle tout cela.

Après ces mises en situation, tous les participants présentent les énoncés du modèle particulaire. Le participant F (qui utilise le manuel Synergie) présente cinq énoncés alors que

les autres (B, C, D et E) en enseignent quatre. Rappelons que le manuel Synergie a un énoncé supplémentaire par rapport au manuel Observatoire, L'humain tel que mentionné à la section sur l'analyse de l'enseignement du modèle particulaire dans les manuels. Les cahiers L'essentiel 3 et ADN définissent également le modèle particulaire à partir de quatre énoncés.

Concernant la nature du modèle particulaire, seul le participant E a mentionné dire aux élèves que le modèle particulaire a des avantages et des limites : « par exemple, ce modèle ne peut pas expliquer la radioactivité ». Précisons qu'il existe une activité sur ces notions dans le cahier ADN (matériel utilisé par l'enseignant E), mais pas dans le cahier L'essentiel 3 (utilisé par les participants B, C et D).

En plus des énoncés, les participants expliquent les trois états de la matière à l'aide du modèle particulaire : « par exemple, le solide a une forme et un volume définis parce que le mouvement de ses particules est limité et les forces d'attraction entre les particules sont fortes ». Par ailleurs, les participants D, E et F ont rapporté qu'ils utilisaient le modèle particulaire pour expliquer les changements d'état : « lorsqu'on fournit l'énergie à l'eau, les particules bougent plus vite alors les forces d'attraction entre ces particules se brisent, ce qui fait que l'eau devient vapeur ». Mais, ce n'est pas le cas des participants B et C ils n'ont pas exprimé explicitement l'utilisation du modèle particulaire pour expliquer les changements d'état.

La troisième question : Quelles activités proposez-vous aux élèves ?

Les enseignants B, C, D, E ont répondu qu'ils proposaient les activités des cahiers et l'enseignant F a dit qu'il demandait à ses élèves de répondre aux questions qui sont à la fin de chaque chapitre du manuel. Même s'ils n'ont pas décrit toutes les activités du cahier utilisé, ils ont précisé que ces activités demandent à l'élève de décrire la forme, le volume, les forces d'attraction entre les particules et le mouvement des particules pour chaque état (solide, liquide et gaz) de la matière. De plus, l'enseignant E a rapporté que ses élèves ont fait une activité en lien avec les limites du modèle particulaire.

La quatrième question : À part les activités du cahier, quelles autres activités plus concrètes proposez-vous aux élèves par exemple des laboratoires ?

Les participants B et C ont répondu ne pas faire de laboratoire. Ils n'ont pas développé leur réponse. Les participants D, E et F ne font pas non plus de laboratoire lors de l'enseignement du modèle particulaire. Cependant, ils ont justifié leur réponse par le fait que le laboratoire qui est en lien avec ce modèle est celui des changements d'état (de solide à liquide à gaz en chauffant la glace), mais comme les élèves ont déjà fait ce laboratoire en première année secondaire alors ces participants ne jugent pas utile de le refaire. Cependant, tel que mentionné plus haut, ils reviennent sur l'explication des changements d'état au moyen du modèle particulaire.

Par ailleurs, les participants B, C, D et F ont rapporté qu'ils amenaient leurs élèves à construire des molécules données au moyen d'un ensemble de boules et de tiges. Les boules représentent des atomes et les tiges, les liaisons chimiques. Ces participants trouvent que c'est une activité concrète, car les élèves manipulent des objets. Le participant E n'a pas fait mention de cette activité.

La cinquième question : Quelles difficultés les élèves éprouvent-ils dans l'apprentissage du modèle particulaire ?

L'enseignante B : « Les élèves comprennent bien quand j'explique. Mais, ils ont des difficultés à se rappeler des notions et à les transférer ». La chercheuse : « À quelles notions faites-vous allusion ? ». L'enseignante B : « Je n'ai pas d'exemple précis, mais c'est ce que j'ai remarqué en général ». La chercheuse : « Que faites-vous pour aider les élèves ? ». L'enseignante B : « Je répète beaucoup les concepts, je fais beaucoup de rappels ».

L'enseignante C : « Ça dépend des élèves, certains n'ont pas de difficulté, mais, pour d'autres, le modèle particulaire est trop abstrait ». La chercheuse : « Que faites-vous pour aider les

élèves à surmonter cette abstraction ? ». L'enseignante C : « Je leur fais l'activité avec les boules et les tiges, elle est concrète, les élèves touchent des objets, ça aide un peu ».

L'enseignant D : « Je ne sais pas. Il me semble que les élèves comprennent ce modèle ».

L'enseignant E :

Au début, les élèves ne comprennent pas le modèle particulière. Mais, quand je fais les changements d'état, ils comprennent mieux, car ils voient à quoi servent les énoncés. Ils servent à expliquer les états de la matière et les changements d'état. L'autre difficulté se présente lorsque j'enseigne les réactions chimiques. Je dois déconstruire ce modèle puisqu'il n'est plus valable dans le cas des réactions chimiques. Les élèves me demandent tout le temps pourquoi je leur ai alors enseigné le modèle particulière, je leur réponds que c'est ainsi...

L'enseignant F :

Lorsque j'ai fait un test formatif, je leur ai demandé de compléter un tableau où il fallait décrire la forme, le volume, l'arrangement des particules, leur mouvement, les forces d'attraction entre les particules pour chaque état de la matière. Je me suis rendu compte que plusieurs élèves n'ont pas réussi à compléter ce tableau. Ils n'arrivent pas à retenir les informations, alors il faut souvent faire des rappels.

La sixième question : Qu'est-ce que les élèves comprennent du modèle scientifique ?

Les enseignants B et C ont dit ne pas enseigner ce qu'est un modèle scientifique. C'est trop abstrait pour leurs élèves.

L'enseignant D :

Je leur explique qu'on utilise un modèle quand on ne peut pas voir quelque chose. Soit qu'elle est trop grande, par exemple la Terre ou elle est trop petite comme les atomes et les molécules. Je leur présente, ensuite, les caractéristiques d'un modèle scientifique. Elles sont dans le manuel.

L'enseignant E :

La boîte scellée que je montre dans la mise en situation a justement pour but de montrer aux élèves qu'il y a des choses qu'on ne peut pas observer. Pour les comprendre, on utilise des modèles scientifiques.

L'enseignant F :

Je présente ses caractéristiques. Mais, il n'y a pas vraiment d'activités en lien avec ces caractéristiques, alors je ne suis pas sûr que les élèves comprennent ce qu'est un modèle scientifique.

La septième question : combien de cours consacrez-vous au modèle particulaire ?

Les enseignants B et C disent consacrer une période et demie (une période équivaut à 75 minutes) pour l'enseignement du modèle particulaire. Les enseignants D, E et F disent consacrer deux périodes en incluant l'enseignement des changements d'état.

La huitième question : Qu'est-ce que les élèves sont censés apprendre à la suite de l'enseignement du modèle particulaire ?

La réponse à cette question n'a pas été spontanée, les participants ont, d'abord, marqué un temps d'arrêt, ensuite, ils ont fourni des réponses semblables. Tous les participants ont dit que les élèves devaient être capables de distinguer un atome d'une molécule. Ils devaient également comprendre le comportement des particules dans les trois états de la matière. Le participant E a ajouté que les élèves devaient apprendre que la matière n'est pas continue.

L'analyse de l'enseignement du modèle particulaire auprès des enseignants

L'analyse des entretiens avec les enseignants conduit à plusieurs constats. Les participants ne trouvent pas que le modèle particulaire est un concept important. Ils étaient même surpris de savoir que ce concept pouvait faire l'objet d'une étude. De plus, deux périodes au maximum sont accordées à son enseignement.

Différentes mises en situation sont effectuées pour amorcer l'enseignement du modèle particulaire. Certaines concernent le concept de particule et la distinction entre l'atome et la molécule, d'autres sont à propos des trois états de la matière et les dernières sont à propos de la nature du modèle. Ce dernier est comparé au modèle d'un couturier d'après le participant

C ou à une boîte scellée qui permet de comprendre des objets invisibles tel que les particules, d'après le participant E.

Tous les participants enseignent le modèle particulaire en présentant directement ses énoncés aux élèves. En d'autres termes, aucun participant n'amène ses élèves à construire les énoncés du modèle particulaire, ce qui revient à affirmer que **le premier critère n'est pas respecté**.

Tableau 74 : Grille d'analyse de l'enseignement de la construction et de l'utilisation du modèle particulaire auprès des participants

Critères d'analyse de la construction et de l'utilisation du modèle particulaire auprès des enseignants participants	Non	Oui
1. L'enseignement des participants permet de construire le modèle particulaire	✓	
2. L'enseignement des participants permet d'utiliser le modèle particulaire pour représenter des réalités.	✓	
3. L'enseignement des participants permet d'utiliser le modèle particulaire pour expliquer des réalités.		✓
4. L'enseignement des participants permet d'utiliser le modèle particulaire pour prédire des réalités.	✓	
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté au 2 ^e cycle		

Tous les participants affirment que le modèle particulaire permet d'expliquer les trois états de la matière sans préciser comment (tableau 74). Seulement trois enseignants expliquent les changements d'état à l'aide de ce modèle. Les autres réalités (la compressibilité, la solubilité, etc.) ne semblent pas être des réalités associées au modèle particulaire. L'un des participants (le participant E) dit même déconstruire ce modèle lorsqu'il enseigne les réactions chimiques. Ainsi, tous les participants mentionnent implicitement le rôle explicatif du modèle particulaire pour une ou deux réalités, ainsi **le troisième critère est respecté pour peu de réalités**. Cependant, aucun participant ne fait allusion à son rôle de représenter et de prédire des réalités. Par conséquent, **le deuxième et quatrième critères ne sont pas respectés**.

Tableau 75 : Appréciation en fonction du nombre de réalités associées au modèle particulière

Appréciation	Peu de réalités (1 à 4)	Quelques réalités (5 à 9)	La majorité des réalités (10 à 13)	Toutes les réalités (14)
Tous les participants	✓			

La majorité des participants (B, C, D et E) présentent les quatre premiers énoncés du modèle particulière. Un seul enseignant (F) présente cinq énoncés (tableau 76). Ainsi, **le sixième critère est respecté.**

Tableau 76 : Appréciation en fonction du nombre d'énoncés du modèle particulière enseignés

Appréciation	Peu d'énoncés (1 à 2)	Quelques énoncés (3 à 4)	La majorité des énoncés (5 à 6)	Tous les énoncés (7)
Les participants B, C, D, E		✓		
Le participants F			✓	

Les participants mentionnent certaines connaissances dont des réalités comme les trois états de la matière, les changements d'état et les énoncés du modèle particulière (**le cinquième et sixième critères sont respectés**). Cependant, le principe de différenciation entre le modèle et la réalité n'est pas du tout abordé par les participants (**le septième critère n'est pas respecté**).

Tableau 77 : Grille d'analyse des connaissances associées au modèle particulaire auprès des enseignants

Critères d'analyse des connaissances associées au modèle particulaire auprès des participants	Non	Oui
5. L'enseignement des participants permet de connaître les réalités.		✓
6. L'enseignement des participants précise les énoncés du modèle particulaire.		✓
7. L'enseignement des participants mentionne l'importance du principe de différenciation entre le modèle et le phénomène ou la réalité qui lui est associé.	✓	
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté au 2 ^e cycle		

La nature du modèle particulaire n'est pas vraiment enseignée, seul un participant (le participant E) mentionne le caractère perfectible du modèle particulaire à ses élèves en considérant le cas de la radioactivité que ce modèle ne peut pas expliquer (tableau 78).

Tableau 78 : Grille d'analyse de l'enseignement de la nature du modèle particulaire auprès des participants

Critères d'analyse de la nature du modèle particulaire auprès des participants	Non	Oui
8. L'enseignement des participants mentionne que le modèle particulaire est une construction théorique.	✓	
9. L'enseignement des participants mentionne que le modèle particulaire a pour fonction de représenter des phénomènes.	✓	
10. L'enseignement des participant mentionne que le modèle particulaire a pour fonction d'expliquer des phénomènes.	✓	
11. L'enseignement des participants mentionne que le modèle particulaire a pour fonction de prédire des phénomènes.	✓	
12. L'enseignement des participants mentionne l'aspect perfectible d'un modèle.	✓ (4 participants)	✓ (un seul participant)
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté au 2 ^e cycle.		

Finalement, pour aider les élèves, les participants ont mentionné faire des rappels pour permettre aux élèves de mémoriser les énoncés du modèle particulaire. Ainsi, **les critères du tableau 79 ne sont pas respectés.**

Tableau 79 : Grille d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire auprès des participants

Critères d'analyse du soutien à l'apprentissage du modèle particulaire auprès des participants	Non	Oui
13. Les participants mentionnent l'importance de recourir à une variété de méthodes didactiques (des laboratoires, des démonstrations, des vidéos) pour montrer et décrire un phénomène.	✓	
14. Les participants mentionnent l'importance des dispositifs variés (des modèles physiques, des modèles virtuels, des icônes, vidéos, etc.) qui visualisent les particules et leurs comportements pour soutenir la compréhension des élèves.	✓	
15. Les participants mentionnent l'importance de vérifier l'évolution des conceptions non scientifiques des élèves (en leur demandant de produire des dessins par exemple).	✓	
16. Les participants mentionnent l'importance d'une démarche didactique pour construire les énoncés du modèle particulaire.	✓	
17. Les participants mentionnent l'importance d'impliquer <u>simultanément</u> un phénomène, sa représentation symbolique et/ou iconique et l'énoncé du modèle particulaire qui l'explique.	✓	
Légende : Non : Critère non respecté; Oui : Critère respecté		

Chapitre 5. La discussion des résultats

Introduction

Pour répondre aux questions de recherche, ce chapitre a pour but de déterminer les lacunes dans l'enseignement de la modélisation tel que présenté dans le programme de formation de l'école québécoise (PFEQ) et les lacunes dans l'enseignement du modèle particulière à partir du curriculum formel et d'après six enseignants. À la suite de cette détermination, des recommandations sont déduites.

5.1. Les lacunes dans l'enseignement de la modélisation

Retour à la première question de recherche

Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le PFEQ, met-elle en évidence dans l'enseignement de la modélisation au secondaire ?

Rappelons que les concepts fondamentaux présentés dans le deuxième chapitre, nous ont permis de définir l'enseignement de la modélisation. Cet enseignement revient, d'une part, à l'enseignement de la construction de modèles à partir de l'explication de certaines réalités et, d'autre part, à l'utilisations des modèles construits pour expliquer d'autres réalités¹⁰ (figure 10). Compte tenu de cette définition, l'enseignement de la modélisation (en excluant celle qui concerne le modèle particulière puisqu'elle fera l'objet d'une section différente) dans le PFEQ (figure 11) comporte plusieurs lacunes d'après l'analyse effectuée au quatrième chapitre.

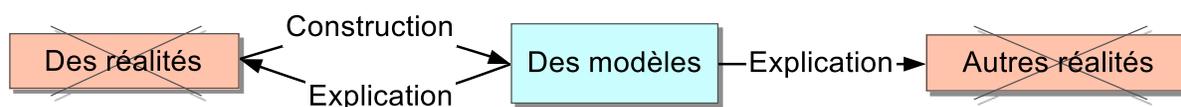


Figure 11 : Représentation de l'enseignement de la modélisation dans le PFEQ

¹⁰ Le code de couleur est utilisé pour mettre en évidence le principe de différenciation entre le modèle qui est une construction théorique et les réalités qu'il explique. Ce code est remplacé par des nuances de gris si la thèse est imprimée en noir et blanc.

En effet, bien que le PFEQ mentionne l'importance de la démarche de modélisation et, l'inclut au deuxième cycle du secondaire, il ne précise pas les réalités à partir desquelles des modèles sont construits. Il ne précise pas non plus les réalités que les modèles construits peuvent expliquer. De plus, ce programme ne mentionne pas l'importance de distinguer un modèle qui est une construction théorique des réalités qui lui sont associées (Robardet & Guillaud, 1997). L'absence de ces précisions peut, d'une part, engendrer une lacune dans la mise en œuvre de la démarche de modélisation et, d'autre part, générer des difficultés à comprendre la nature d'un modèle scientifique chez l'élève. En effet, c'est en construisant et en utilisant des modèles scientifiques que l'élève peut davantage comprendre leur nature.

5.2. Les lacunes dans l'enseignement du modèle particulière

Retour à la deuxième question de recherche

Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le PFEQ, la progression des apprentissages, les épreuves d'évaluation, les manuels scolaires, les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulière ?

5.2.1. Les lacunes du modèle particulière dans le PFEQ

Plusieurs lacunes ont été relevées en analysant l'enseignement du modèle particulière dans le PFEQ (figure 12).

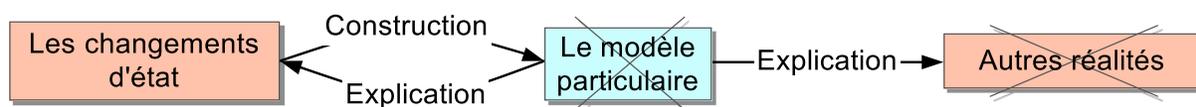


Figure 12 : Représentation de l'enseignement du modèle particulière dans le PFEQ

La construction du modèle particulaire : une démarche non explicitée

Ainsi, bien que la construction de ce modèle à partir des changements d'état soit mentionnée, cette démarche n'est pas explicitée dans le programme de formation de l'école québécoise. Il n'est pas non plus question des éléments qui la permettent, comme l'importance de générer des explications, des entités non observables, des analogies, etc.

Des contenus non précisés et d'autres désorganisés

Les énoncés du modèle particulaire et les réalités qu'il est censé expliquer ne sont pas précisés dans le programme de formation de l'école québécoise. Il n'y a pas non plus de mention explicite du principe de différenciation entre le modèle particulaire et les réalités qui lui sont associées.

De plus, rappelons que pour utiliser et comprendre la nature d'un modèle, il est important que ce dernier soit enseigné simultanément avec les réalités qu'il explique. Ce n'est pas le cas dans le programme de formation de l'école québécoise puisque les réalités en lien avec le modèle particulaire (les états de la matière, les changements d'état, etc.) sont prescrites au premier cycle et le modèle particulaire, qui peut les expliquer, est prévu au deuxième cycle (tableau 29). Ce déphasage (entre le modèle et les réalités qu'il explique) désorganise le contenu scolaire si bien qu'il semble incohérent. Il s'agit d'une désyncrétisation, un effet à éviter pour réussir la transposition didactique (Thouin, 2017).

Une deuxième désyncrétisation des savoirs peut être relevée dans le cas des particules. En effet, ces dernières sont postulées par le premier énoncé du modèle particulaire (la matière est constituée de particules) qui est prescrit au deuxième cycle. Cependant, les atomes et les molécules (qui sont des particules) sont abordés dès le premier cycle (tableau 29).

Aucune mention des difficultés d'apprentissage du modèle particulaire

Finalement, bien que l'apprentissage du modèle particulaire présente des difficultés chez les élèves, le PFEQ ne les aborde pas. Il ne mentionne pas, par exemple, les conceptions non

scientifiques que pourraient avoir les élèves. Leur prise en compte est pourtant nécessaire pour les faire évoluer.

5.2.2. Les lacunes du modèle particulaire dans la PDA

La construction du modèle particulaire : une démarche inexistante

Contrairement au programme de formation, la progression des apprentissages ne fait aucune mention de la démarche de modélisation ni ne présente sa progression d'apprentissage comme Schwartz et col. (2009) l'ont fait. Il n'est donc pas question de la construction du modèle particulaire dans la progression des apprentissages.

L'utilisation du modèle particulaire : des questions émergent...

La progression des apprentissages précise les réalités associées au modèle particulaire. Ainsi, elle mentionne l'importance d'expliquer les états de la matière, les changements d'état et le phénomène de dissolution au moyen du modèle particulaire (figure 13).

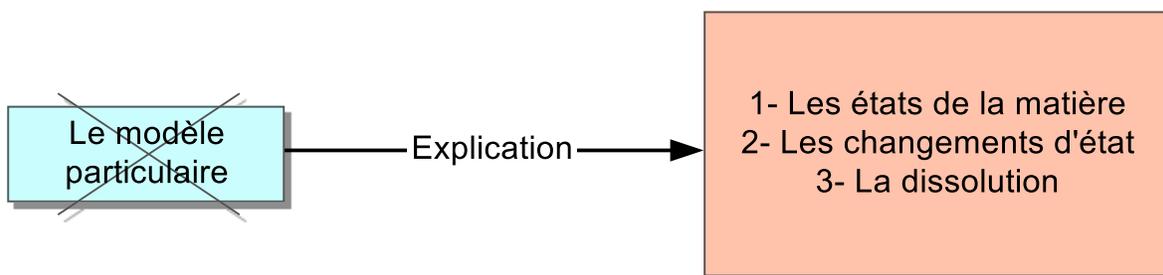


Figure 13 : Représentation de la fonction explicative du modèle particulaire dans la PDA

Elle mentionne également la fonction représentative du modèle particulaire en précisant que ce dernier est utilisé pour représenter les changements chimiques (la réaction de décomposition, de synthèse, d'oxydation et de précipitation) et la conservation de masse (figure 14).

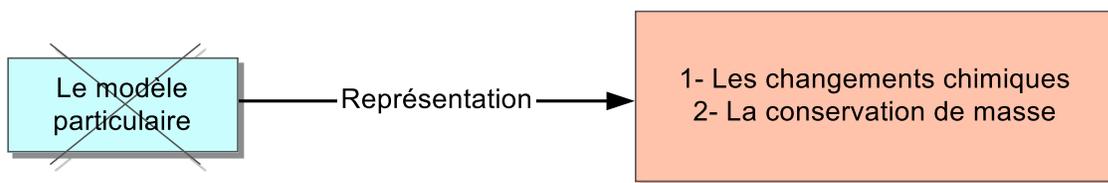


Figure 14 : Représentation de la fonction représentative du modèle particulaire dans la PDA

Préciser l'utilisation du modèle particulaire est très utile, car elle permet, entre autres, de comprendre le rôle du modèle. Néanmoins, cette utilisation suscite des questions. Pourquoi les changements chimiques et la conservation de masse ne sont-ils pas expliqués à l'aide du modèle particulaire d'après la progression des apprentissages ? Pourquoi ce dernier est utilisé seulement pour les représenter ?

Le contenu : des lacunes similaires à celle du programme de formation

Concernant le contenu, la progression des apprentissages ne précise pas les énoncés du modèle particulaire. Elle ne mentionne pas le principe de différenciation entre le modèle particulaire et les réalités qui lui sont associées. La désorganisation du contenu observée dans le programme de formation (le déphasage entre les réalités et le modèle qui les explique ainsi que la prescription des atomes et des molécules qui procède le postulat de leur existence) est également présente dans la progression des apprentissages. Cette désorganisation peut être justifiée par le fait que la progression des apprentissages est bâtie à partir du programme de formation. À cette désorganisation, nous pouvons ajouter « le savoir en miette » de Astolfi (1992, p. 49). En effet, la conservation de la matière lors des changements est un concept prescrit au premier cycle, mais ce n'est qu'en quatrième année secondaire que la conservation de la masse lors des changements est présentée à l'aide du modèle particulaire. Ce déphasage est d'autant plus incompréhensible que le concept de masse est abordé dès le premier cycle dans le programme de formation et dans la progression des apprentissages. Finalement, comme pour le PFEQ, la progression des apprentissages ne tient pas compte des conceptions non scientifiques des élèves en lien avec le modèle particulaire, ni de leurs difficultés d'apprentissage.

5.2.3. Les lacunes du modèle particulaire dans les manuels

L'absence des questions et des problèmes à l'origine de la construction du modèle particulaire

Les questions qui permettent la construction des énoncés du modèle particulaire ne sont pas présentes dans les manuels examinés, ce qui est en accord avec les propos de Astolfi (1992) qui soutient que le problème ou la question qui sont à l'origine d'un savoir scolaire donné ont disparu :

On tend à oublier qu'un énoncé est souvent la réponse à un problème [...]. Or, le texte du savoir a trop souvent perdu la trace de ce questionnement originel et se présente sous de plates apparences descriptives, égrenant des vérités intangibles. Comme si les faits étaient les faits, ni plus ni moins. Comme s'il suffisait de les recueillir avec rigueur... et de s'y soumettre (Astolfi, 1992, p. 52).

Ainsi, dans le cas du modèle particulaire, les énoncés ne sont pas construits dans les manuels. Ils sont présentés comme des vérités dont le caractère perfectible de toute construction théorique a disparu. Cela a pour conséquence de ne pas permettre à l'élève de comprendre la nature du modèle scientifique, en particulier que le modèle est une construction théorique et qu'il est perfectible.

L'utilisation du modèle particulaire : ambiguë au 1^{er} cycle et incomplète au 2^e cycle

Au premier cycle, une divergence peut être relevée entre les Éditions Chenelière Éducation et les Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. En effet, les premières présentent les énoncés du modèle particulaire et les utilisent de manière explicite pour expliquer plusieurs réalités : les états de la matière, la compressibilité, les changements d'état, la dissolution et la conservation des propriétés lors des changements physiques (tableau 44). Les deuxièmes éditions ne présentent pas les énoncés du modèle particulaire au premier cycle, mais elles les utilisent quand même, ce qui rend cette utilisation ambiguë. Par exemple, considérons le propos en lien avec l'état solide mentionné précédemment :

Il (le bloc de métal pour illustrer l'état solide) conservera sa forme et son volume quel que soit le contenant dans lequel on le placera. Les particules (atomes ou molécules, représentés dans l'illustration 2)¹¹ qui composent le bloc de métal sont solidement liées

¹¹ L'illustration 2 est reportée dans le quatrième chapitre.

les unes aux autres. Elles n'ont donc pas la possibilité de se déplacer les unes par rapport aux autres [...].

Ce passage décrit la forme et le volume d'un métal. Ensuite, il glisse vers le concept de particule sans expliciter le passage entre, d'une part, les deux observables (volume et forme) et, d'autre part, les particules qui sont solidement liées. De plus, cette explication fait intervenir le concept de particule, lequel n'est pas encore connu par l'élève. Comment peut-on expliquer un concept par un autre que l'élève ne connaît pas ? Cet exemple n'est pas isolé, malheureusement, nous pourrions en dire autant pour plusieurs réalités : l'état liquide, l'état gazeux, la compressibilité, les mélanges homogènes et hétérogènes (tableau 44). Cela rejoint ce qui est rapporté par Astolfi dans le cas de l'enseignement de la structure de la Terre (1992 p. 50) : « la rédaction du texte est très ambiguë, elle oscille constamment entre ce qui relève d'un observable et ce qui résulte de la modélisation ». Un expert comprend les glissements ou les oscillations entre la réalité à la théorie, mais ce n'est pas du tout le cas pour un novice comme un élève de première année du secondaire. D'ailleurs, Astolfi admet que les auteurs des manuels ne sont pas sensibles aux difficultés des novices. « Le savoir est pour eux déjà compacté, mis dans une certaine « forme », sans qu'ils soient à même de percevoir que celle-ci n'est compréhensible qu'à ceux qui savent déjà » (Astolfi, 1992, p. 52).

En troisième année du secondaire, l'utilisation du modèle particulaire pour représenter et expliquer quelques réalités est bien présente (la figure 15), contrairement à ce qui a été constaté dans la progression des apprentissages, où certaines réalités sont expliquées et d'autres sont représentées. Il est intéressant de souligner que les manuels ont été publiés avant la progression des apprentissages, ce qui peut expliquer cette différence. La progression des apprentissages a donc ajouté des lacunes ?

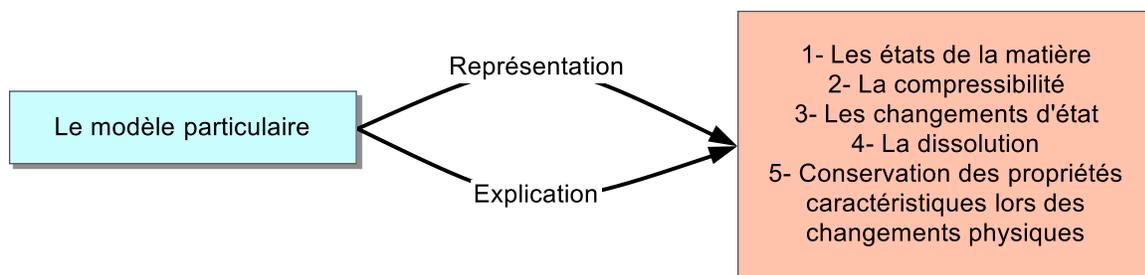


Figure 15 : Représentation de l'utilisation du modèle particulaire dans les manuels

Cependant, les réalités en lien avec le modèle particulaire sont partielles (tableau 47). De plus, il n'y a aucune mention du rôle prédictif du modèle particulaire dans les manuels ni du principe de différenciation entre les réalités et le modèle particulaire

Des énoncés du modèle particulaire manquants

Le modèle particulaire est présenté à partir de huit énoncés d'après de Vos et Verdonk (1996). Cependant, dans les Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. et dans les Éditions Chenelière Éducation, il est question de quatre et cinq énoncés respectivement. Cette divergence dans le nombre d'énoncés peut être expliquée par l'absence des énoncés du modèle particulaire dans le PFEQ et la progression des apprentissages.

Les énoncés manquants concernent 1- la composition des particules en atomes (septième énoncé) qui permet de distinguer un élément d'un composé et 2- le réarrangement des atomes (septième énoncé) qui permet d'expliquer les réactions chimiques. En plus de ces deux lacunes, il en existe une troisième, dans les Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., où il manque le sixième énoncé qui concerne la nature des particules qui permet de distinguer une substance pure d'un mélange.

Cette lacune dans les énoncés fait en sorte que les concepts paraissent éclatés alors qu'ils devraient être structurés autour d'une seule « grande idée » qui est le modèle particulaire. Effectivement, en examinant le tableau 44, on observe que l'explication des réalités fait

intervenir plusieurs concepts : le modèle particulaire, la distribution des particules, la « sorte de particules », la « sorte d'atomes » et les liaisons chimiques. Cela rejoint les propos d'Astolfi lorsqu'il affirme que les manuels proposent aux élèves des contenus dépourvus de toute hiérarchisation (Astolfi, 1992), ce qui revient à l'absence de « grandes idées » (un concept fondamental dans la progression des apprentissages tel que présenté au deuxième chapitre).

Des contenus incohérents

Certains contenus sont incohérents et pourraient même entraîner des obstacles didactiques, car ils ne distinguent pas la réalité du modèle. Pour plus de précisions, il est intéressant d'examiner les deux passages ci-dessous du manuel de l'élève des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. de deuxième année du secondaire.

1- Lorsque des atomes différents s'unissent, cela forme une autre substance. Ainsi, deux atomes d'hydrogène qui se lient à un autre atome d'oxygène forme de l'eau. (Bélanger, Chantal, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 2, 2006, p. 42).

2- La molécule a des propriétés différentes des atomes qui la composent. Par exemple, le sodium pur est un métal alors que le chlore pur est un gaz toxique. Une fois qu'ils sont liés chimiquement, ils forment le sel de table, qui est comestible. (Bélanger, Chantal, & St-André, Univers - Manuel de l'élève 2, 2006, p. 42).

En effet, dans le premier extrait, il est dit que : « **lorsque deux atomes différents s'unissent, ils forment une substance** ». On observe un glissement du modèle (deux atomes) à la réalité (une substance). Le passage du concept de molécule à la substance n'est pas explicité. La formulation aurait dû être par exemple : « **lorsque deux atomes différents s'unissent, ils forment une molécule. On assume que certaines substances sont constituées de molécules** ».

Dans le deuxième passage, il est dit qu'une molécule a des propriétés différentes des atomes qui la composent. Cependant l'exemple qui explique cet énoncé ne concerne pas les propriétés d'une molécule et celles des atomes qui la constituent, mais plutôt les propriétés de réactifs (le métal de sodium et le gaz de chlore) et du produit qu'ils forment (le sel de table). Cet

amalgame des propriétés des particules et de celles des substances pourraient être à l'origine des conceptions erronées, dont il a été question au deuxième chapitre, qui consistent à attribuer des propriétés macroscopiques aux particules. Par ailleurs, le sel de table (la substance chlorure de sodium) n'est pas formé de « molécules » puisqu'il s'agit d'un composé ionique...

« Trop d'informations... Tue l'information »

Tel que rapporté par Astolfi, « trop d'informations... tue l'information » (Astolfi, 1992, p. 47). En effet, souvent, les manuels présentent un grand nombre d'informations que l'élève ne peut pas vraiment comprendre et encore moins appliquer. Par exemple, dans le deuxième chapitre du manuel de l'élève 2 des Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., il est question des éléments, du tableau périodique, du numéro atomique, du symbole chimique, de la masse atomique, du modèle atomique, des réactions nucléaires, etc. Il s'agit d'un cumul de connaissances dépourvu de toute structure qui ne permet pas vraiment à l'élève d'apprendre. « En effet, apprendre, c'est au moins autant procéder à la structuration d'éléments qu'en ajouter de nouveau » (Astolfi, 1992, p. 49).

5.2.4. Les lacunes du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage et les épreuves

Tel que mentionné dans le quatrième chapitre, les activités qui sont présentes dans les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage ont essentiellement pour objectifs la mémorisation et la compréhension des connaissances (des réalités et les quatre énoncés du modèle particulaire). Les activités qui permettent à l'élève de construire les énoncés du modèle particulaire sont inexistantes et celles qui l'amène à utiliser le modèle particulaire sont rares et partielles (annexe 7). Elles sont rares, car nous avons compté sept activités qui permettent à l'élève d'utiliser le modèle particulaire dans l'ensemble des deux éditions, et ce, pour le premier et le deuxième cycles à la fois. Elles sont partielles, car elles ne permettent que d'expliquer les états de la matière et de représenter un mélange homogène, un composé,

un élément, la dilution, la dissolution et le produit d'une réaction de précipitation. Finalement, les activités ne rendent pas compte de la nature du modèle particulaire.

Concernant les épreuves, comme dans le cas des guides d'enseignement et des cahiers d'apprentissage, elles ont essentiellement pour objectif la compréhension des réalités et de quelques énoncés du modèle particulaire. L'utilisation du modèle est très rare et très partielle. Il en a été question seulement pour représenter une bouteille après son remplissage et pour expliquer la compressibilité. Il n'a nulle part été question de la nature du modèle particulaire.

Dans la taxonomie de Bloom rénovée (Raynal & Rieunier, 2014), les activités intellectuelles classées par ordre de difficulté sont : 1- se rappeler, 2- comprendre, 3- appliquer, 4- analyser, 5- évaluer et 6- créer. Selon cette taxonomie, les activités associées au modèle particulaire sont du premier et du deuxième niveaux. L'utilisation qui revient à une application du modèle pour représenter, expliquer et prédire est très rare. Quant à la création, qui revient à la construction du modèle, elle est inexistante.

5.2.5. Les lacunes du modèle particulaire d'après les pratiques des enseignants

Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum informel, tel que présenté par quelques enseignants, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulaire ?

L'analyse des entretiens avec les enseignants montre que le modèle particulaire n'est pas perçu comme un apprentissage important. Lorsqu'il est enseigné (parfois, il ne l'est même pas), on lui consacre au maximum deux périodes de 75 min. Il est associé, par la moitié des enseignants interviewés aux trois états de la matière. L'autre moitié utilise ce modèle pour expliquer également les changements d'état. Mais, il ne semble pas être utilisé pour expliquer d'autres réalités. L'enseignement ne permet pas de construire les énoncés du modèle. Les enseignants interviewés ont rapporté qu'ils présentaient les énoncés et faisaient faire aux

élèves les activités des cahiers (d'apprentissage ou maison). L'enseignement ne permet pas vraiment de connaître la nature du modèle.

Finalement les pratiques des enseignements ne permettent pas de combler les lacunes dans l'enseignement du modèle particulière identifiées dans le curriculum formel. Ce résultat est probablement dû à un manque de formation disciplinaire des enseignants de science surtout dans le contexte actuel où ils doivent enseigner plusieurs disciplines (univers matériel, univers vivant, Terre et astronomie et technologie) à la fois (Hasni, Morisoli, Samson, & Owen, 2009). Ces auteurs ont émis cette hypothèse en s'appuyant sur une enquête réalisée auprès d'enseignants de science et technologie. Ces derniers veulent que les manuels présentent et expliquent le contenu disciplinaire.

Tableau 80 : Résumé des lacunes de l'enseignement de la modélisation et du modèle particulaire dans le curriculum formel

Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le PFEQ, met-elle en évidence dans l'enseignement de la modélisation au secondaire ?	
1- Les réalités et les problèmes qui permettent la construction des modèles ne sont pas vraiment explicités. 2- La description de la démarche de modélisation et ses composantes ne sont pas présentées dans le programme de formation.	
Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, la progression des apprentissages, les épreuves d'évaluation, les manuels scolaires, les guides d'enseignement et les cahiers d'apprentissage, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulaire ?	
Les lacunes communes au PFEQ, à la PDA et aux manuels	1- Aucune description de la démarche de construction du modèle particulaire, 2- Le principe de différenciation entre la réalité et le modèle n'est pas présent. 3- Certains contenus sont desynchronisés. 4- Le modèle particulaire ne fait pas partie des concepts généraux (chapitre 3), il ne représente pas une « grande idée » d'après le curriculum formel. 5- Aucune mention des difficultés d'apprentissage des élèves associées à ce modèle.
PFEQ	6- Les réalités qui permettent la construction du modèle particulaire sont sous-estimées, il est question d'une seule réalité qui est les changements d'état. 7- Les énoncés du modèle particulaire ne sont pas précisés.
PDA	6- Aucune mention de la construction du modèle particulaire. 7- Au premier cycle, aucune mention de l'utilisation du modèle particulaire. 8- Au deuxième cycle, celle-ci est discutée : pour certaines réalités le modèle sert à expliquer, pour d'autres, il sert seulement à représenter. 9- Pour certains cas, le contenu semble « en miette », par exemple, la conservation de la matière est prescrite au premier cycle et celle de la masse est prévue en 4 ^e année secondaire bien que le concept de masse est prescrit au premier cycle.
Les manuels	6- Aucune mention de la construction du modèle particulaire. 7- Au premier cycle, l'utilisation du modèle est ambiguë. 8- Au deuxième cycle, l'utilisation est incomplète. Par exemple, les manuels n'utilisent pas le modèle particulaire dans le cas de réactions chimiques. 9- Les énoncés du modèle diffèrent d'un manuel à un autre et ils sont incomplets par rapport à ceux de Vos et Verdonk (1996), ce qui entraîne un contenu non

	hiérarchisé et éclaté. 10- Au premier cycle, certains contenus son incohérents et 11- d'autres sont superflus.
Les guides d'enseignement, les cahiers d'apprentissage et les épreuves	Les activités sont essentiellement basées sur la mémorisation et la compréhension du contenu. Elles ne permettent pas la construction des énoncés du modèle. De plus, l'utilisation des énoncés est très rare et incomplète.

Tableau 81 : Résumé des lacunes de l'enseignement du modèle particulaire par les enseignants

Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum informel, tel que présenté par quelques enseignants, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulaire ?
1- D'après les enseignants participant à cette étude, l'enseignement du modèle particulaire ne permet pas de construire ses énoncés. 2- Son utilisation se restreint aux trois états de la matière et, au mieux, aux changements d'état également. 3- Les participants ne mentionnent pas l'enseignement du principe de différenciation entre les réalités et le modèle. 4- Ils ne mentionnent pas non plus la prise en compte des difficultés d'apprentissage des élèves en lien avec ce modèle.

5.3. Des recommandations pour l'enseignement de la modélisation

Compte tenu des lacunes dans l'enseignement de la modélisation identifiées précédemment, il est important que le PFEQ définisse les réalités à partir desquelles les modèles sont construits. En définissant ces réalités, d'une part, la construction des modèles sera plus facile à mettre en œuvre et, d'autre part, un lien sera établi entre la première compétence (chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique) et la deuxième (mettre à profit ses connaissances scientifiques et technologiques). Ces deux compétences semblent indépendantes dans la version actuelle du PFEQ.

En effet, les réalités à expliquer à partir d'une construction de modèles représentent des problèmes. Orange (1997) qualifie la relation entre le problème et les connaissances de relation circulaire : « un problème entraîne des connaissances qui modifient à leur tour le champ des problèmes et des connaissances naît un problème dont la résolution modifie la connaissance (figure 16) ».

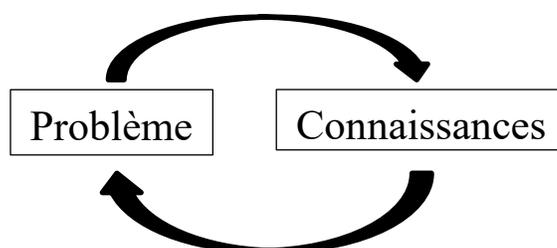


Figure 16 : Relation entre le problème et les connaissances (*Orange, Problème et modélisation en biologie, 1997, p. 11*)

5.4. Des recommandations pour l'enseignement du modèle particulière

Les lacunes présentées précédemment, dans l'enseignement du modèle particulière, confirment les propos d'Astolfi (1992, p. 52) qui concernent les savoirs présentés à l'élève, lesquels sont décrits comme étant « des savoirs propositionnels, c'est-à-dire une suite de contenus, d'où ont disparu toute hiérarchisation, toute modélisation, toute problématique ».

En effet, dans le cas particulier du modèle particulière, les problèmes à l'origine des énoncés du modèle ont disparu (il n'y a pas de problématique), la modélisation i.e., d'une part, la construction du modèle en question est inexistante et, d'autre part, l'utilisation des énoncés pour expliquer des réalités est très rare (il n'y a pas vraiment de modélisation) et la hiérarchisation est également absente (tableau 82).

Tableau 82 : Synthèse sur l'enseignement du modèle particulière

Enseignement du modèle particulière	Lacunes	Conséquences	Recommandations
Démarche de modélisation	1- Les problèmes à l'origine des énoncés sont inexistants. 2- La construction des énoncés est inexistante. 3- L'utilisation des énoncés est rares.	1- L'élève ne développe pas la démarche de modélisation. 2- Il n'apprend pas à « faire la science ». 3- Il ne peut pas comprendre la nature des modèles ni celle de la science.	1- Amener l'élève à construire les énoncés du modèle. 2- Amener l'élève à utiliser les énoncés du modèle. 3- Enseignement explicite de la nature du modèle
Contenu associé au modèle particulière	1- Un déphasage entre l'enseignement des réalités et le modèle	Des obstacles à l'apprentissage du modèle.	Enseignement simultané des réalités et du modèle
	2- Au premier cycle, on ne distingue pas les particules des substances. Donc, le contenu peut être ambigu et incohérent pour un élève.		Enseignement explicite du principe de différenciation entre une réalité et un modèle
	3- Des énoncés insuffisants	1- Un contenu éclaté 2- Absence d'une hiérarchisation du contenu	Structurer l'enseignement autour du modèle particulière.

Ces lacunes ont des conséquences sur l'apprentissage du modèle particulière (tableau 82). Elles ne permettent pas de développer la démarche de modélisation. Elles ne permettent pas

non plus de comprendre la nature du modèle particulaire ni la nature des modèles scientifiques de manière générale. De telles lacunes engendrent des conceptions épistémologiques de niveau inférieur chez les élèves (tableau 1) tel que mentionné au premier chapitre. Ces conceptions entraînent à leur tour une conception de l'apprentissage basée sur l'approche de reproduction des connaissances, laquelle est en corrélation positive avec une motivation superficielle de l'apprentissage (tableau 2).

En conséquence, il est important de remédier à ces lacunes. Des recommandations sont présentées dans le tableau 82 ayant pour but d'introduire les trois caractéristiques absentes mentionnées par Astolfi (1992) : la problématique, la modélisation et la hiérarchisation. Pour plus de précision, la prochaine section présente des recommandations pour chacun des documents du curriculum formel (le programme de formation, la progression des apprentissages, les guides d'enseignement et les manuels).

5.4.1. Des recommandations pour le programme de formation

Le modèle particulaire représente une « grande idée », car il est au centre de plusieurs réalités (figure 17).

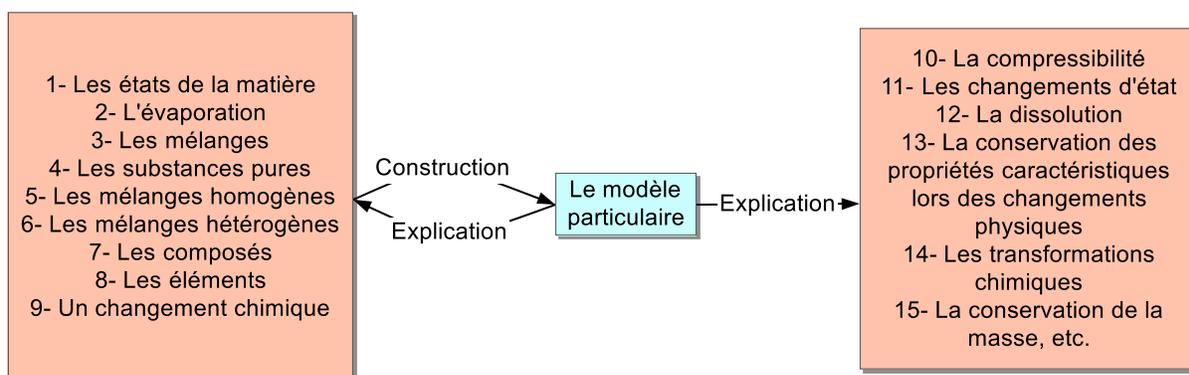


Figure 17 : Représentation de l'enseignement recommandé du modèle particulaire

Ses énoncés pourraient être construits pour expliquer certaines réalités (les états de la matière, l'évaporation, les mélanges et les substances pures, les mélanges hétérogènes et les

mélanges homogènes, les composés et les éléments et un changement chimique). Une fois construits, ces énoncés pourraient être utilisés pour expliquer d'autres réalités telles que la compressibilité, les changements d'état, la dissolution, etc.

En plus de mentionner l'importance de la démarche de modélisation, il serait important que le PFEQ prescrive la construction des énoncés du modèle particulière, et ce, en explicitant, d'une part, les réalités qui permettent cette construction et, d'autre part, les énoncés du modèle particulière. De plus, le programme devrait préciser les réalités que les énoncés du modèle particulière peuvent expliquer (figure 17). Il devrait également prescrire l'enseignement du principe de différenciation entre la réalité et le modèle, l'enseignement explicite de la nature du modèle particulière et du modèle scientifique en général ainsi que, la prise en compte des difficultés d'apprentissage des élèves et les conceptions non scientifiques associées à ce modèle.

5.4.2. Des recommandations pour la progression des apprentissages

Pour compléter le PFEQ, la progression des apprentissages devrait, entre autres, décrire la construction des énoncés du modèle particulière. Pour ce faire, elle devrait préciser l'énoncé à construire et le cycle ou le niveau scolaire de sa construction. Le tableau 83 représente une proposition de construction des énoncés du modèle particulière. Rappelons que ces énoncés sont ceux qui ont été produits par de Vos et Verdonk (1996) de manière à rendre accessible le modèle particulière à des élèves du secondaire tout en conservant des idées acceptables du point de vue scientifique (deuxième chapitre).

Nous recommandons la construction des six premiers énoncés du modèle particulière (tableau 83) au premier cycle. Par exemple, en considérant l'expérience de la vaporisation d'eau, on pourrait amener les élèves à postuler que la matière n'est pas continue puisqu'elle ne s'évapore pas d'un seul coup. Elle est donc constituée de petits morceaux appelés particules (Genzling, 1988). Le deuxième, le troisième, le quatrième et le cinquième énoncés pourraient

être construits à partir des trois états de la matière (Bridle & Yeziarski, Evidence for the effectiveness in inquiry-based, particulate-level instruction on conceptions of the particulate nature of matter, 2012). Le sixième énoncé pourrait être construit pour distinguer un mélange et d'une substance pure.

Tableau 83 : Construction et utilisation du modèle particulaire dans la PDA proposée

La construction et l'utilisation du modèle particulaire dans la PDA proposée	1^{er} cycle	3^e	4^e
1. La PDA mentionne de générer l'énoncé qui postule que toute matière est formée de particules.	✓		
2. La PDA mentionne de générer un énoncé qui postule le mouvement des particules et qui décrit ce mouvement en fonction de la température.	✓		
3. La PDA propose ensuite de générer un énoncé qui permet de décrire le vide entre les particules dans un gaz.	✓		
4. La PDA mentionne de générer un énoncé qui postule la présence de force d'attraction mutuelle entre deux particules et qui la décrit en fonction de la distance sépare les deux particules. Le cas d'un gaz.	✓		
5. La PDA mentionne de générer un énoncé qui permet de décrire la force d'attraction mutuelle entre deux particules dans un liquide et dans un solide. Cet énoncé décrit également le mouvement des particules et leur disposition dans un liquide et dans un solide.	✓		
6. La PDA mentionne de générer un énoncé qui permet de distinguer un mélange d'une substance pure à partir du type de particules (un mélange comporte deux ou plusieurs types de particules alors qu'une substance pure est composé d'un seul type de particule).	✓		
7. La PDA mentionne de générer un énoncé qui postule qu'une particule peut être une composition d'atomes. Cet énoncé explique une réaction chimique par un réarrangement des atomes.		✓	
8. La PDA mentionne de générer un énoncé qui postule la structure d'un atome d'où les modèles atomiques			✓
9. La PDA mentionne d'utiliser le modèle particulaire pour représenter des réalités empiriques.	✓	✓	✓
10. La PDA mentionne d'utiliser le modèle particulaire expliquer des réalités empiriques.	✓	✓	✓
11. La PDA mentionne d'utiliser le modèle particulaire pour prédire des réalités empiriques.	✓	✓	✓

La figure 18 décrit l'enseignement recommandé au premier cycle centré autour du modèle particulaire. Cet enseignement permettrait à l'élève, entre autres, de construire les six premiers énoncés du modèle particulaire à partir de réalités. Il permettrait également d'introduire le principe de différenciation¹².

Au deuxième cycle, en troisième année secondaire, l'enseignement recommandé est représenté par la figure 19. Cet enseignement permettrait, entre autres, de distinguer un composé d'un élément (un élément n'étant pas décomposable chimiquement en d'autres substances), de construire le septième énoncé du modèle particulaire qui permet d'expliquer les réactions chimiques.

En quatrième année secondaire, l'enseignement recommandé est représenté par la figure 20. On y trouve les modèles atomiques et les modèles de liaison. Bien que cet enseignement n'a pas été abordé dans cette étude, nous avons élaboré la figure 20 pour assurer la continuité et compléter le contenu prescrit par le programme de formation.

Il est important de signaler que tous les concepts prescrits dans le programme de formation se retrouvent dans la progression des apprentissages que nous proposons (figures 18, 19 et 20). Ces concepts sont réorganisés autour du modèle particulaire pour rétablir les trois caractéristiques mentionnées par Astolfi (1992) i.e. la problématique, la modélisation et la hiérarchie (en considérant que le modèle particulaire est une « grande idée »).

À quelques exceptions, les concepts seraient maintenus à leur cycle d'origine i.e. les concepts prescrits au premier cycle, seraient toujours à ce cycle dans la progression proposée. Il en serait de même pour les concepts prescrits en troisième et en quatrième année du secondaire.

¹² Dans les figures 18, 19 et 20, les réalités sont représentées en brun et les concepts théoriques en bleu. Les modèles et le septième énoncé du modèle particulaire (bien qu'ils soient des concepts théoriques, donc devraient être représentés en bleu) sont mis en évidence en vert. Les réalités représentées en violet assurent la continuité du savoir d'un cycle ou d'une année à une autre.

Les exceptions concernent essentiellement le modèle particulaire, le concept de substance pure, le modèle atomique de Dalton, le tableau périodique et ses éléments. Ainsi, l'apprentissage du modèle particulaire et celui de la substance pure (qui sont prescrits au deuxième cycle) seraient proposés dès le premier cycle pour éviter la désynchronisation des connaissances. En effet, dans le programme de formation, le concept de substance pure est prescrit au deuxième cycle bien que les méthodes de séparation physique sont prescrites au premier cycle. Nous recommandons de prescrire le concept de substance pure dès le premier cycle. Il suffirait de la définir comme une substance qui ne peut plus être décomposée par des méthodes de séparation physique.

Au contraire, nous recommandons de retirer le modèle atomique de Dalton, le tableau périodique et ses éléments du premier cycle (ils sont prescrits au premier cycle dans le programme de formation) et de les inclure au deuxième cycle uniquement. De cette façon, on éviterait de les présenter sous forme de savoir propositionnel. Par exemple, le modèle atomique de Dalton (qui est le septième énoncé du modèle particulaire) serait construit à partir d'une situation problème impliquant l'explication d'une réaction chimique en troisième année secondaire.

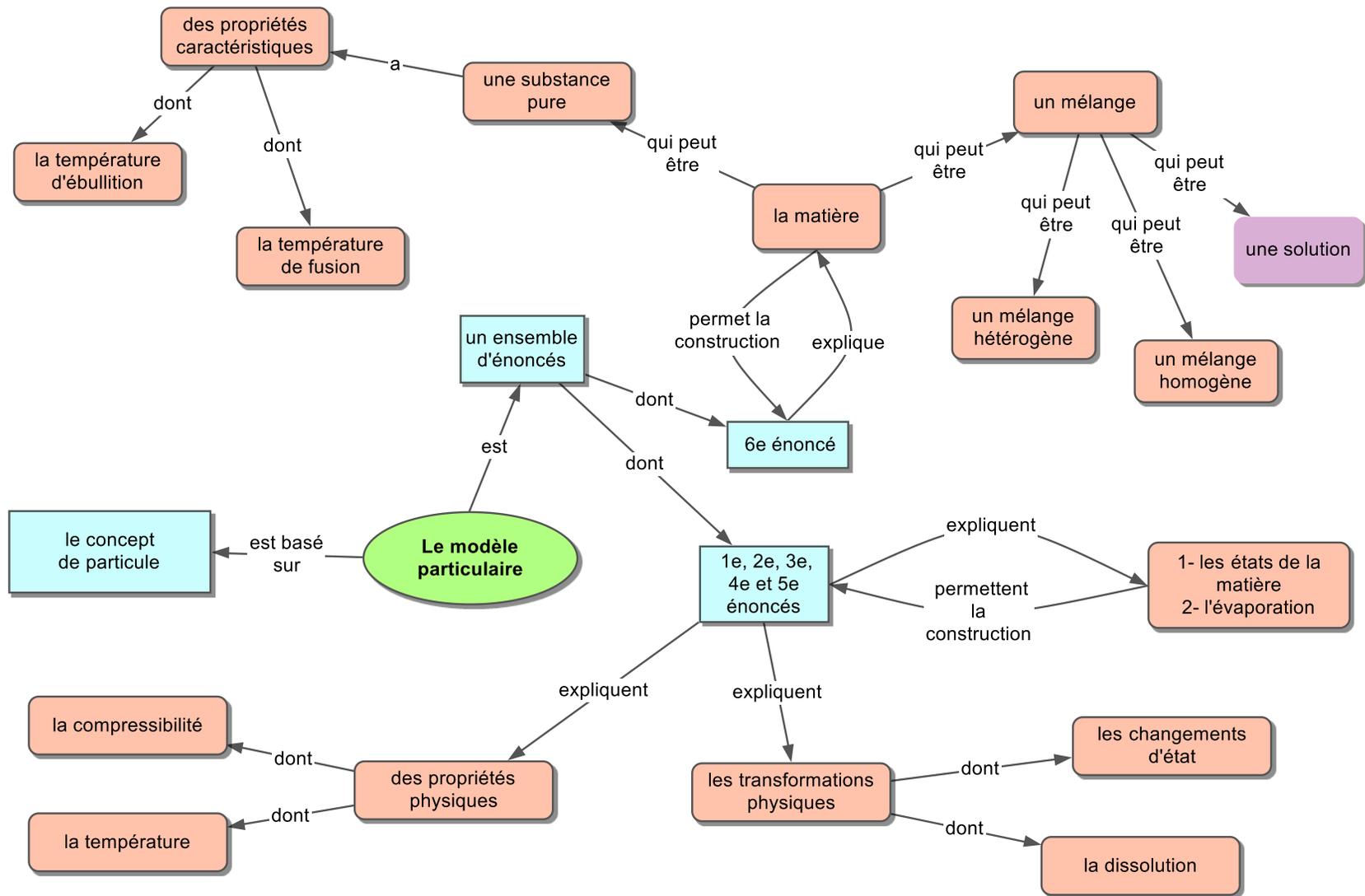


Figure 18 : Représentation du contenu d'enseignement, au 1^{er} cycle, autour du modèle particulaire

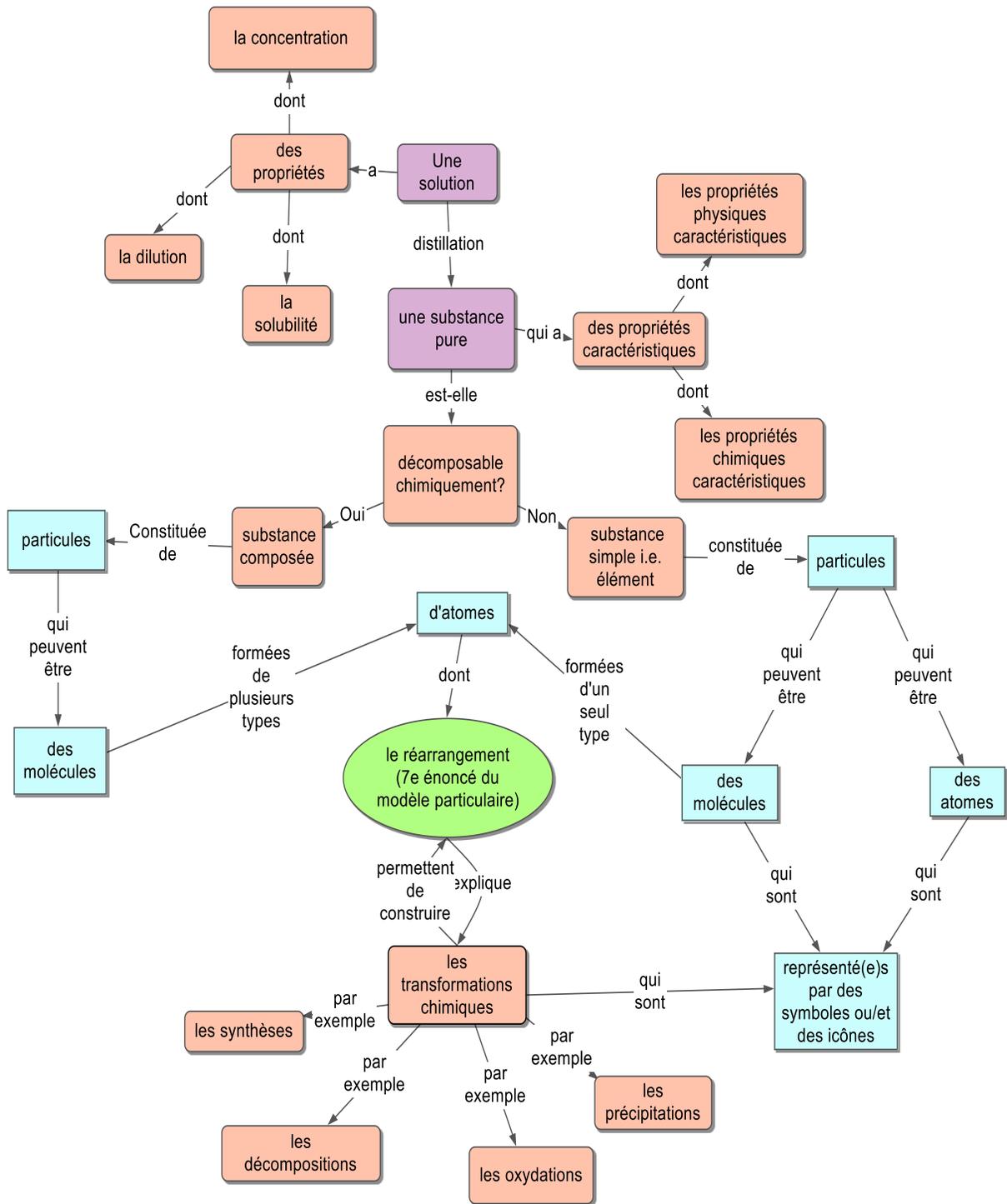


Figure 19 : Représentation du contenu d'enseignement, en troisième année secondaire, autour du modèle particulaire

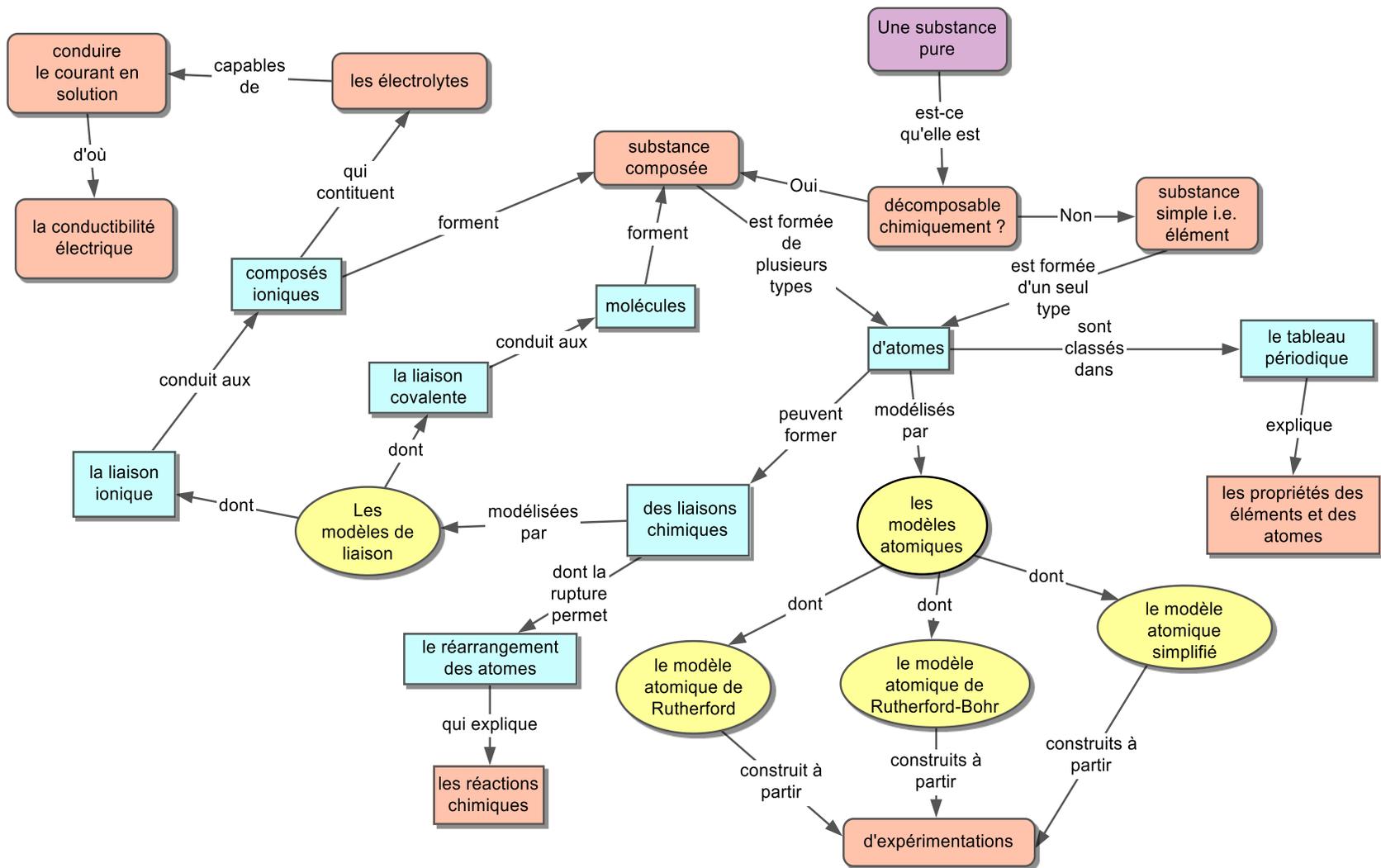


Figure 20 : Représentation du contenu d'enseignement, en quatrième année secondaire, autour du modèle particulaire

5.4.3. Des recommandations pour les manuels et les guides d'enseignement

Nous recommandons l'application d'une démarche didactique à l'enseignement du modèle particulaire. Cette démarche comporterait plusieurs types d'activités (Thouin, 2019) tel que précisé au deuxième chapitre. Cette section a pour but de présenter des exemples qui ont en vue de construire les énoncés du modèle particulaire.

Mouvement des particules

Objectifs de l'activité

Cette activité permet aux élèves de voir l'influence de la température sur la diffusion d'un liquide (plus la température est grande plus la diffusion est rapide). Elle amène également les élèves à expliquer leurs observations en termes de particules, tel que proposé, au premier énoncé (plus la température est élevée, plus les particules bougent plus vite).

Les activités fonctionnelles

On commence par questionner les élèves sur ce qui se passe lorsque l'on met une goutte de colorant, une fois, dans un verre contenant de l'eau chaude et, une autre fois, dans un verre contenant de l'eau froide. Plus précisément, est-ce que la diffusion du colorant sera semblable si celui-ci est dans une eau chaude ou froide ?

L'expérience

Les élèves effectuent ensuite l'expérience ou l'observent dans une vidéo, notent leurs observations et proposent une explication en tenant compte du premier énoncé (l'eau et le colorant sont constitués de particules).

Cette activité devrait amener les élèves à en déduire que **les particules sont en mouvement et que ce mouvement est plus rapide si la température est plus élevée. Donc il existe une relation directe entre la température d'une quantité de la matière et l'énergie cinétique moyenne de ses particules.**

L'activité de structuration

Visionnement de vidéo sans le son, les participants décrivent verbalement ce qu'ils ont observé.

Visionnement de vidéo une deuxième fois avec le son, les participants dessinent ce qu'ils ont observé.

Les trois états de la matière

Objectif de l'activité

L'activité a pour objectifs : 1- d'aider les élèves à se représenter l'arrangement et le mouvement des particules à l'état solide, liquide et gazeux; 2- d'amener les élèves à expliquer les caractéristiques observables d'un état de la matière (volume et forme) à partir de l'arrangement et du mouvement des particules de cet état et 3- de commencer à construire un réseau de concepts associé au modèle particulaire.

Pour rédiger cette activité, nous nous sommes inspirée de l'activité qui s'intitule : « Putting the world in a box » qui se trouve dans le site de « Target Inquiry ».

Les activités fonctionnelles

Pour mettre en contexte les élèves, on peut leur demander comment nous pouvons classifier la diversité de la matière qu'il y a autour de nous. Les réponses des élèves seront probablement divergentes, certaines peuvent conduire à la classification selon les trois états de la matière. On peut alors demander aux élèves pourquoi la classification selon l'état est bonne (en effet, n'importe quelle matière, à part quelques exceptions comme l'éponge, est soit un liquide ou un solide ou un gaz).

Le matériel requis

Des billes pour modéliser les particules d'une substance dans les trois états.

Les caractéristiques des trois états observées

Pour faire un rappel des connaissances antérieures, on peut demander aux élèves quelles sont les caractéristiques observables de l'état liquide, solide et gazeux (1- Le solide a une forme et un volume définis. 2- Le liquide a un volume défini et une forme indéfinie. 3- Le gaz a une forme et un volume indéfinis).

Le problème

On invite les élèves à proposer des arrangements des particules qui expliqueraient ces caractéristiques. Ainsi, on dira :

Les scientifiques observent les caractéristiques de la matière et les attribuent aux comportements des particules. Dans le cas des états de la matière, ils pensent que la forme et le volume sont dus aux arrangements et aux mouvements des particules. »

Imagine que tu agrandis la taille d'un objet, jusqu'à ce que tu arrives à « voir » les particules qui le composent. Reproduis, en utilisant des billes, leur arrangement à chaque état.

Quel arrangement des billes peut expliquer l'état solide ? Quel arrangement des billes peut expliquer l'état liquide ? Quel arrangement des billes peut expliquer l'état gazeux ? Réponds à ces questions par écrit. Illustre tes réponses par des dessins.

Les énoncés 3, 4 et 5 du modèle particulaire constituent une bonne solution à ce problème.

3- L'espace vide entre les particules d'un gaz est beaucoup plus important que celui occupé par les particules elles-mêmes. Dans un contenant fermé, les particules d'un gaz sont réparties uniformément, ce qui implique que la gravité a un effet négligeable sur elles.

4- Il existe une attraction mutuelle entre les particules, mais sa force diminue rapidement avec la distance. Dans un gaz de l'attraction entre les particules est négligeable, sauf à haute pression et à basse température, lorsqu'il risque de se condenser.

5- Dans les liquides et les solides, les particules sont beaucoup plus rapprochées et soumises à l'attraction mutuelle. Dans les solides, les particules sont disposées de manière régulière, chaque particule est capable seulement de vibrer autour d'une position fixe. Dans les liquides, les particules sont disposées de manière irrégulière et se déplacent d'un endroit à l'autre.

Les activités de structuration

Des vidéos qui expliquent l'arrangement et le mouvement des particules pour chaque état seront ensuite présentées. Après le visionnement, on peut discuter des limites du modèle des billes en mentionnant qu'il ne tient pas compte du mouvement des particules. Pour structurer les nouveaux concepts, les élèves sont amenés à construire une carte conceptuelle. La figure 21 est un exemple de carte.

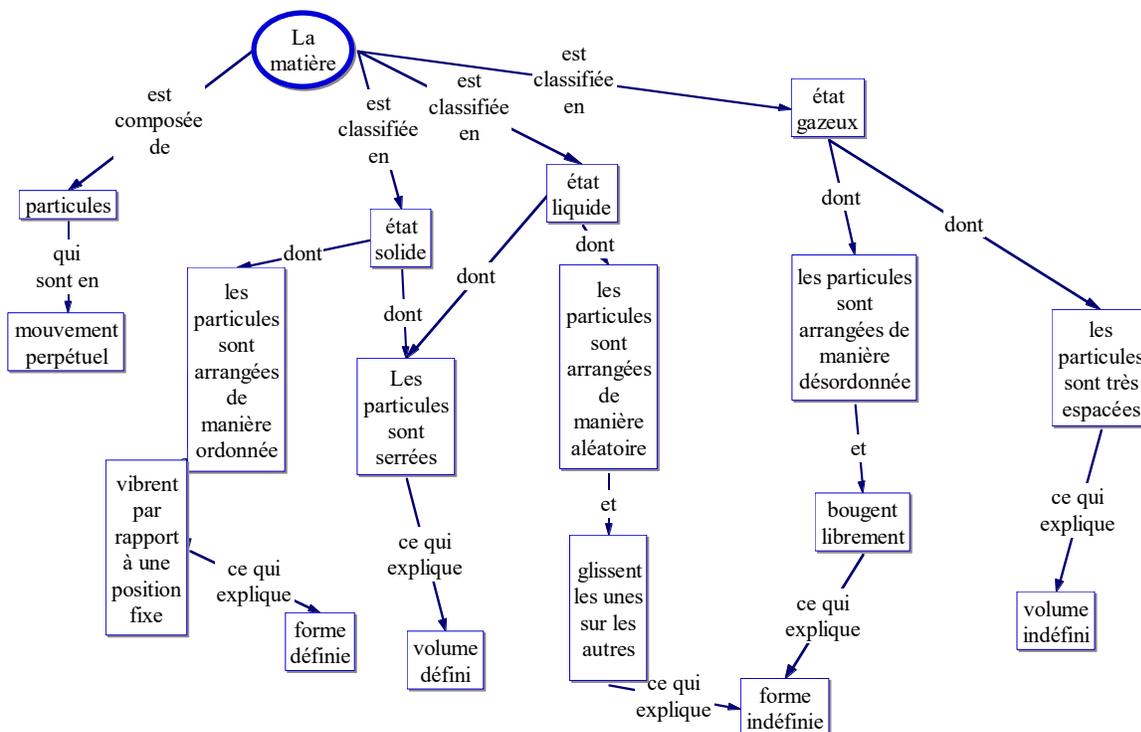


Figure 21 : Carte conceptuelle représentant les caractéristiques des trois états de la matière

Autre classification de la matière

Objectif de l'activité

L'activité 4 a pour objectif d'amener les élèves à expliquer à partir de la nature des particules la présence de différentes substances comme le fer, le sucre, le sel, etc.

Expérience

On peut présenter aux élèves deux plaques : l'une en fer et l'autre en aluminium. On leur demande : 1- de décrire l'aspect de chacune des plaques (son état, sa couleur, etc.) 2- de les comparer (leurs ressemblances, leurs différences) et de proposer une solution qui explique pourquoi les deux plaques ne sont pas identiques. Les explications des élèves devraient conduire au sixième énoncé du modèle particulaire.

6- Chaque substance pure possède son propre type de particules. Deux substances pures différentes possèdent deux types de particules différents. Un mélange contient plus d'un type de particules.

L'activité de structuration

Au moyen des boules et des tiges, les élèves peuvent représenter le gaz de dioxygène, le gaz carbonique, l'eau liquide, le chlorure de sodium, etc.

Réaction chimique

Objectif de l'activité

L'activité 5 a pour objectif d'amener les élèves à expliquer l'hydrolyse de l'eau à partir du comportement des particules.

Expérience

Les élèves font l'expérience de l'hydrolyse de l'eau, notent leurs observations (les tubes à essais qui sont plongés dans le bécher qui contient une solution d'électrolytes se vident petit à petit à des vitesses différentes lorsqu'un courant passe). Cela peut être interprété par un dégagement de gaz dans les deux tubes à essais. Les explications des élèves et leur généralisation à n'importe quelle autre réaction devraient conduire au septième énoncé du modèle particulaire.

7- Dans une réaction chimique, les particules se comportent comme si elles se composaient d'une ou de plusieurs sous-entités appelées atomes. Ces derniers sont conservés dans une réaction. Une réaction est donc un réarrangement des atomes. Chacun des éléments chimiques (environ 100) a son propre type d'atomes.

Les activités de structuration

- Visualisation de vidéos de réactions chimiques.
- Au moyen des boules et des tiges, les élèves peuvent représenter des réactions chimiques que l'enseignante propose.

Conclusion

L'acquisition d'une culture scientifique est, entre autres, un élément qui légitime l'enseignement de la science (Orange, 1997). Malheureusement, des enquêtes ont montré que cette culture présente des lacunes au Québec. De plus, les élèves sont de moins en moins attirés par des carrières scientifiques et leurs résultats au programme pancanadien d'évaluation (PPCE) et au programme international pour le suivi des acquis (PISA) montrent une tendance générale à la baisse.

Par ailleurs, l'enseignement de la science présente, généralement, plusieurs lacunes. Celles-ci peuvent être associées au contenu scientifique scolaire, aux activités scientifiques scolaires ou à l'enseignement de la nature de la science. En effet, le contenu scientifique est essentiellement un cumul de connaissances, lesquelles semblent décousues par manque de continuité et de liens (Astolfi, 1992). Les problèmes et les questions à l'origine de ces connaissances et les processus de leur construction ont disparu (Astolfi, 1992). Elles apparaissent alors à l'élève comme des vérités irréfutables (Martinand et al., 1992), ce qui entraîne une méconnaissance de la nature de la science et des conceptions épistémologiques de niveau inférieur chez les élèves. En effet, les conceptions épistémologiques des élèves, i.e. leurs croyances relatives au savoir scientifique et à la manière dont il est construit, peuvent être soit de niveau inférieur soit de niveau plus évolué (Hofer et Pintrish, 1997). Au niveau inférieur, le savoir est considéré comme une vérité absolue qui existe avec certitude, la structure du savoir est une accumulation discrète du contenu scientifique, le savoir est transmis par une autorité extérieure et l'évaluation du savoir est dualiste i.e. le savoir est accepté ou non accepté. Au niveau plus évolué, le savoir est provisoire et évolutif. C'est un continuum interdépendant. Il est construit et on se voit soi-même comme constructeur de savoir et son évaluation est nuancée avec des opinions multiples. Les conceptions épistémologiques sont très importantes à considérer, car elles ont un impact sur les conceptions de l'apprentissage de la science chez les élèves (Hofer et Pintrish, 1997; Muis, 2007) qui sont à leur tour en corrélation avec le type de la motivation (Ho et Liang, 2015;

Karakolidis, Pitsia, & Emvalotis, 2019). En effet, un élève qui a une conception épistémologique de niveau inférieure voit l'apprentissage comme une simple reproduction des connaissances qui lui sont extérieures ce qui est corrélé à une motivation superficielle. Au contraire, un élève qui a une conception épistémologique évoluée perçoit l'apprentissage comme une construction des connaissances faite par lui-même, ce qui est corrélé à une motivation intrinsèque et profonde.

Qu'en est-il de l'enseignement de la science au Québec ? Présente-t-il les lacunes dont il a été question précédemment i.e. des lacunes associées au contenu scolaire, aux activités scolaires et à la nature de la science ?

Pour préciser notre recherche, nous avons choisi d'assimiler l'enseignement de la science à l'enseignement de la modélisation. À première vue, cette assimilation peut sembler grossière, mais il n'en est rien. En effet, la modélisation est une activité clé en science. Les scientifiques passent la grande majorité de leur temps à construire des modèles, les tester, les réviser et les appliquer (Frigg & Hartmann, 2012). L'enseignement de cette activité présente plusieurs avantages. Il permet aux élèves de « faire la science », de construire les connaissances et, par suite, de comprendre la nature de la science. Tel que mentionné, cela a pour effet de les amener à avoir des conceptions épistémologiques plus évoluées et une conception constructiviste de l'apprentissage, ce qui implique une motivation intrinsèque, laquelle est indispensable à l'engagement. Pour expliciter l'analyse de l'enseignement de la modélisation, nous avons choisi comme modèle, le modèle particulaire, car il représente un contenu scientifique fondamental de l'univers matériel. Ainsi, le choix de l'enseignement de la modélisation et particulièrement l'enseignement du modèle particulaire nous permettent d'analyser à la fois l'enseignement d'une activité scientifique, d'un contenu scientifique et de la nature de la science.

Plusieurs recherches ont été effectuées pour améliorer l'enseignement de la modélisation. Par exemple, le processus OGEM (observer, générer, évaluer et modifier) a été développé pour

amener les élèves à construire des modèles (Williams & Clement, 2015). Une progression des apprentissages pour, d'une part, construire et utiliser des modèles et, d'autre part, évaluer et modifier les modèles construits a été élaborée et validée (Schwartz, et autres, 2009). Il a également été question de plusieurs autres concepts fondamentaux dont les problèmes explicatifs pour amener les élèves à générer les modèles (Orange, 2012), les analogies pour amener les élèves à proposer des explications (Osborne & Patterson, 2011), les discussions et les discours argumentatifs (Driver, Newton, & Osborne, 2000) pour les amener à évaluer et à modifier les modèles construits, les activités à trois niveaux (décrire une réalité, la représenter et l'expliquer au moyen d'un modèle) pour amener les élèves à utiliser les modèles (Gabel, 2005), le principe de différenciation pour amener les élèves à distinguer le modèle de la réalité (Robardet & Guillaud, 1997), etc. De plus, les énoncés du modèle particulière ont également fait l'objet d'une recherche (de Vos & Verdonk, 1996). Cependant, plusieurs lacunes dans l'enseignement de la modélisation ont été répertoriées. Par exemple, dans les curriculums formels de plusieurs pays, la construction des modèles est inexistante et leur utilisation ne tient pas compte des limites des modèles. Plusieurs enseignants pensent que la construction des modèles dépasse les aptitudes de leurs élèves (Van Driel & Verloop, 2002). Plusieurs difficultés dans l'apprentissage de la nature et de la fonction des modèles en général et du modèle particulière ont été relevées. Qu'en est-il au Québec ? Nous n'avons pas trouvé d'étude sur l'enseignement de la modélisation dans le programme de formation de l'école québécoise ni l'enseignement du modèle particulière au Québec bien que ce dernier modèle représente une « grande idée », c'est-à-dire qu'il permet d'expliquer plusieurs réalités et de relier plusieurs concepts théoriques. C'est pourquoi, nous avons décidé d'analyser l'enseignement de la modélisation à partir du programme de formation ainsi que l'enseignement du modèle particulière dans le curriculum formel (PFEQ, progression des apprentissages, les manuels, les guides d'enseignement, les cahiers d'activités et les épreuves) et auprès des enseignants. Ces analyses ont permis de répondre aux questions de recherche ci-dessous.

- Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, met-elle en évidence dans l'enseignement de la modélisation au secondaire ?

- Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum formel, tel que présenté dans le programme de formation, la progression des apprentissages, les épreuves d'évaluation, les manuels scolaires, les cahiers d'apprentissage et les guides d'enseignement, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulière ?

- Quelles lacunes l'analyse didactique du curriculum informel, tel que présenté par quelques enseignants, met-elle en évidence dans l'enseignement du modèle particulière ?

Pour répondre à ces questions, nous avons procédé en trois étapes. Dans la première étape, nous avons élaboré des critères de l'enseignement de la modélisation et de l'enseignement du modèle particulière en s'appuyant sur le cadre conceptuel i.e. à partir des recherches effectuées et des concepts fondamentaux dont il a été question pour améliorer ces enseignements. Dans la deuxième étape, nous avons décrit l'enseignement de la modélisation tel que présenté dans le programme de formation et l'enseignement du modèle particulière tel que présenté dans le curriculum formel et auprès de certains enseignants. À la troisième étape, cette description a été analysée compte tenu des grilles élaborées à la première étape, ce qui a permis d'identifier plusieurs lacunes dans l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulière.

En effet, bien que le programme de formation mentionne explicitement la démarche de modélisation au deuxième cycle, il ne la décrit pas. De plus, il ne précise pas vraiment les réalités et les problèmes qui permettent la construction des modèles. Par rapport au cas du modèle particulière, le programme de formation ne décrit pas sa construction. Il ne mentionne qu'une seule réalité (les changements d'état) qui serait à l'origine de sa construction. Il ne précise pas ses énoncés. Le contenu associé à ce modèle est désyncrétisé à cause du

déphasage entre les réalités (présentées au premier cycle du secondaire) et les énoncés qui expliquent ses réalités (présentés au deuxième cycle). Il n'est nulle part question, dans le PFEQ, du principe de différenciation entre le modèle particulière et les réalités qui lui sont associées, ni des difficultés d'apprentissage de ce modèle. Finalement, le programme de formation ne considère pas le modèle particulière comme une « grande idée » ni même faisant partie des concepts généraux.

Plusieurs lacunes relevées dans le programme de formation se retrouvent dans la progression des apprentissages (absence des énoncés du modèle particulière, désyncrétisation de certains contenus, absence du principe de différenciation, aucune mention des difficultés d'apprentissage du modèle particulière, ce dernier ne représente pas une « grande idée »). Aussi, la progression des apprentissages ne mentionne pas du tout la construction du modèle particulière. Son utilisation est absente au premier cycle et elle est discutable au deuxième cycle, car, pour certaines réalités, le modèle sert à expliquer et, pour d'autres, il sert à représenter, et ce, sans qu'on précise la raison de cette distinction. Finalement, certains contenus en lien avec le modèle particulière semblent « en miette » dans la progression des apprentissages. Par exemple, la conservation de la matière est prescrite au premier cycle, mais celle de la masse fait partie du deuxième cycle bien que le concept de la masse est connu dès le premier cycle.

Les manuels également ne font pas mention de la construction du modèle particulière. L'utilisation de ce modèle est ambiguë au premier cycle dans les Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. En effet, il est utilisé dès la première année secondaire avant même qu'il ne soit présenté à l'élève (il est présenté dans le manuel de troisième année secondaire). En troisième année secondaire, ce modèle est utilisé de manière incomplète dans les manuels. Par exemple, il n'est pas utilisé pour expliquer les réactions chimiques. De plus, ses énoncés sont incomplets comparativement à ceux proposés par de Vos et Verdonk (1996), ce qui entraîne un contenu éclaté et non hiérarchisé. Finalement, au premier cycle, d'une part, certains contenus associés au modèle particulière sont incohérents, car on ne distingue pas

vraiment les propriétés des substances de celles des particules qui composent les substances et, d'autre part, certains sont superflus comme le numéro atomique, la masse atomique, les réactions nucléaires, etc. Ces concepts sont présentés en deuxième année du secondaire sans que l'élève comprenne leur origine, leur sens ou leur utilité.

Dans les guides d'enseignement, les cahiers d'apprentissages et les épreuves, les activités sont essentiellement basées sur la mémorisation et la compréhension du contenu. La construction des énoncés du modèle particulaire est inexistante et leur utilisation est très rare et incomplète. Ces activités peuvent renforcer, chez les élèves, la croyance que l'apprentissage est une reproduction d'un savoir qui leur est extérieur.

Pour les enseignants participants à cette étude, l'enseignement du modèle particulaire ne permet pas de construire ses énoncés. Son utilisation est restreinte aux trois états de la matière et, au mieux, aux changements d'état. Les participants ne mentionnent pas le principe de différenciation, ni les difficultés d'apprentissage de ce modèle.

Ces lacunes ne permettent pas de développer la démarche de modélisation, ni de comprendre la nature des modèles, ce qui confirme que les savoirs présentés à l'élève sont « des savoirs prépositionnels, c'est-à-dire, une suite de contenus, d'où ont disparu toute hiérarchisation, toute modélisation, toute problématique ».

Pour remédier à ces lacunes, nous avons proposé plusieurs recommandations pour l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulaire. Pour ce faire, des améliorations sont suggérées pour chaque document (le programme de formation, la progression des apprentissages, les manuels et les guides d'enseignement). Ainsi, pour améliorer l'enseignement de la modélisation, le programme de formation devrait définir les réalités à partir desquelles un modèle est construit. Ces réalités représentent le problème à l'origine du modèle en question. Par exemple, dans le cas du modèle particulaire, ses énoncés pourraient être construits à partir : du phénomène d'évaporation, des états de la matière, des

mélanges et des substances pures, des mélanges homogènes et hétérogènes, des composés et des éléments et d'un changement chimique. Une fois construits, les énoncés du modèle particulière pourraient être utilisés pour expliquer d'autres réalités telles que la compressibilité, les changements d'état, la dissolution, les réactions chimiques, etc. Aussi, le programme de formation devrait prescrire le modèle particulière comme étant une « grande idée » ou un concept général compte tenu du nombre de réalités qui lui sont associées. De cette façon, la hiérarchisation du savoir pourrait être rétablie. De plus, le programme de formation devrait prescrire l'enseignement explicite du principe de différenciation entre la réalité et le modèle et celui de la nature du modèle particulière et du modèle scientifique de manière générale. Il devrait également mentionner les difficultés d'apprentissage du modèle particulière.

Pour compléter le programme de formation, nous avons bâti une progression des apprentissages du modèle particulière. Ainsi, nous proposons la construction et l'utilisation des six premiers énoncés au premier cycle. Ces derniers sont en lien avec le concept de particule et de liaisons entre les particules. Le septième énoncé, en lien avec les réactions chimiques entre autres, serait construit et utilisé en troisième année du secondaire et le huitième, en quatrième année secondaire. De cette façon, la problématique et la modélisation seraient rétablies dans l'enseignement du modèle particulière. De plus, des cartes conceptuelles ont été élaborées pour mettre en évidence la hiérarchisation du savoir (le modèle particulière étant une idée centrale), sa continuité, les liens entre les concepts et le principe de différenciation au moyen d'un code de couleur (ou de nuances de gris).

Soulignons que tous les concepts prescrits dans le programme de formation et dans la progression des apprentissages se retrouvent dans notre proposition. Ils sont même maintenus à leur cycle ou année d'origine à quelques exceptions près. En effet, notre proposition n'a pas pour objectif de retirer ou d'ajouter des concepts. Elle sert plutôt à rétablir la problématique, la modélisation et la hiérarchisation dans l'enseignement du modèle

particulaire en incluant la construction et l'utilisation des énoncés et en réorganisant les concepts associés au modèle particulaire.

Les exceptions concernent essentiellement le modèle particulaire, le concept de substance pure, le modèle atomique de Dalton, le tableau périodique et ses éléments. Ainsi, nous recommandons l'enseignement du modèle particulaire et celui de la substance pure (qui sont prescrits au deuxième cycle) dès le premier cycle pour éviter la désynchronisation du savoir et l'enseignement du modèle de Dalton, le tableau périodique et ses éléments (qui sont prescrits au premier cycle dans le programme de formation) au deuxième cycle pour éviter le savoir propositionnel.

Finalement, une démarche didactique (Thouin, 2017) est recommandée pour les manuels et les guides d'enseignement.

Cette recherche a l'avantage d'avoir analysé l'enseignement de la modélisation dans le programme de formation de l'école québécoise au secondaire et d'avoir identifié les lacunes en lien avec cet enseignement. La limite de cette recherche est d'avoir considéré le cas particulier du modèle particulaire. Toutefois, choisir un modèle en particulier est inévitable, car cela permet de préciser la recherche et de spécifier ses objectifs pour pouvoir les atteindre. De plus, le modèle particulaire est un modèle fondamental à l'univers matériel.

Pour identifier les lacunes dans l'enseignement du modèle particulaire, six enseignants ont été interviewés. La taille de cet échantillon peut paraître faible. Cependant, les résultats obtenus lors des entrevues permettent d'explorer les pratiques des enseignants en lien avec l'enseignement du modèle particulaire et d'en identifier les lacunes surtout que ces dernières ont été rapportées par tous les participants, ce qui revient à une saturation des données. En effet, d'après les réponses des participants, les énoncés du modèle particulaire ne sont pas construits et leur utilisation est restreinte (pas de problématique, pas de modélisation). De

plus, le modèle particulière ne semble pas représenter, pour les participants, une « grande idée » à laquelle sont associés plusieurs autres concepts (pas de hiérarchisation).

Pour identifier les lacunes dans l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulière, des grilles ont été élaborées par la chercheuse. Celles-ci sont évidemment perfectibles. Toutefois, elles sont basées sur plusieurs recherches ayant pour objectif l'amélioration de l'enseignement de la modélisation. De plus, elles ont été validées par un comité de chercheurs didacticiens.

À la suite de l'identification des lacunes dans l'enseignement de la modélisation et l'enseignement du modèle particulière, plusieurs recommandations ont été proposées par la chercheuse. Toutefois, celles-ci n'ont pas été validées empiriquement, bien qu'il soit raisonnable de croire à leur bienfondé, puisqu'elles découlent d'un cadre théorique regroupant plusieurs recherches.

Finalement, compte tenu de la dernière limite, il serait pertinent de valider empiriquement les recommandations formulées par la chercheuse. De plus, étendre cette recherche à l'enseignement d'autres modèles (autre que le modèle particulière) serait judicieux. Ainsi, on pourrait examiner l'enseignement des autres modèles de l'univers matériel tel que les modèles atomiques, les modèles de liaison et des modèles des autres univers, c'est-à-dire l'univers vivant et l'univers Terre et espace.

Bibliographies

- Abraham, R. M., Williamson, V. M., & Westbrook, S. L. (1994). A Cross-Age study of the understanding of five chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(2), pp. 147-165.
- Adadan, A., Trundle, K. C., & Irving, K. E. (2010). Exploring grade 11 students' conceptual pathways of the particulate nature of matter in the context of multirepresentational instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(8), 1004-1035.
- Adadan, E., & Savasci, F. (2012). An analysis of 16-17-year-old students' understanding of solution chemistry concepts using two-tier diagnostic instrument. *International Journal of Science Education*, 34(4), pp. 513-544.
- Adbo, K., & Taber, K. S. (2009). Learners' mental models of the particle nature of matter : a study of 16-years-old swedish science students. *International Journal of Science Education*, 31(6), 757-786.
- Albarello, L. (2011). *Choisir l'étude des cas comme méthode de recherche*. Bruxelles: Éditions De Boeck .
- Andersson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, pp. 53-85.
- Astolfi, J.-P. (1992). *L'école pour apprendre. L'élève face au savoir*. Issy-les-Moulineaux: ESF éditeur.
- Astolfi, J.-P., & Develay, M. (1989). *La didactique des sciences* (éd. 6, 2005). Paris: Presses Universitaires de France.
- Astolfi, J.-P., Darot, E., Ginshbourger-Vagel, Y., & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Bruxelles: De Boeck.
- Astolfi, J.-P., Giordan, A., Gohau, G., Host, V., Martinand, J.-L., Rumelhard, G., & Zadounaisky, G. (1978). *Quelle éducation scientifique pour quelle école ?* Paris: Presses Universitaires de France.
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B., & Vérin, A. (1998). *Comment les enfants apprennent les sciences ?* Paris: RETZ.
- Augustin, A.-B. (2015). Recent semantic developments on models. *Science & Education*, 24, pp. 1245-1250.
- Aurousseau, E. (2017). Étude de pratiques d'enseignement relatives à la modélisation en sciences et technologies avec des enseignants du secondaire. *Thèse présentée comme exigence partielle du doctorat en éducation*. Université du Québec à Chicoutimi en association avec l'Université du Québec à Montréal, Canada.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique* (éd. 2011). Paris: Vrin.
- Bachelard, G. (1986). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Bamberger, Y. M., & Davis, E. A. (2011). Middle-school science students' scientific modelling performances across content areas and within a learning progression . *International Journal of Science Education*, pp. 1-26.
- Bélangier, M., Chantal, J.-M., & St-André, B. (2006). *Univers - Manuel de l'élève 2*. Saint-Laurent (Québec): ERPI.

- Bélangier, M., Chatel, J.-M., & St-André, B. (2006). *Univers - Manuel de l'élève 1*. Saint-Laurent (Québec): ERPI.
- Ben-Ziv, R., Eylon, B.-S., & Siberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable ? *Journal of Chemical Education*, *63*(1), pp. 64-66.
- Bodner, G. M., Gardner, D. E., & Briggs, M. W. (2005). Models and modeling. *Chemists' Guide to Effective Teaching*, 67.
- Bourque, D. R., & Carlson, G. R. (1987). Hands-on versus computer simulation methods in chemistry. *Journal of Chemical Education*, *64*(3), 232-234.
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualisation of scientific explanation for science education. *Science Education*, *95*, pp. 639-669.
- Bretz, S. L. (2008). Qualitative research in chemistry education. (D. Bunce, Éd.) *In Nuts and Bolts of Chemical Education Research*, pp. 79-99.
- Bridle, C. A., & Yeziarski, E. J. (2012). Evidence for the effectiveness in inquiry-based, particulate-level instruction on conceptions of the particulate nature of matter. *Journal of Chemical Education*, *89*, pp. 192-198.
- Bridle, C. A., & Yeziarski, E. J. (2012). Evidence for the effectiveness of inquiry-based particulate-level instruction on conceptions of the particular nature of matter. *Journal of Chemical Education*, *89*, 192-198.
- Canpolat, N. (2006). Turkish undergraduates' misconceptions of evaporation, evaporation rate and vapour pressure. *International Journal of Science Education*, *28*(15), pp. 1757-1770.
- Canpolat, N., Pinarbasi, T., & Sozibilir, M. (2006). Prospective teachers' misconceptions of vaporisation and vapor pressure. *Journal of Chemical Education*, *83*(8), pp. 1237-1242.
- Carey, S., & Smith, C. (1993). On understanding the nature of scientific knowledge. *Educational Psychologist*, *28*(3), pp. 235-251.
- Carey, S., Evans, R., Honda, M., Jay, E., & Unger, C. (1989). "An experiment is when you try it and see if it works": A study of grade 7 students' understanding of the construction of scientific Knowledge. *International Journal of Science Education*, *11*, pp. 514-529.
- Cariou, J.-Y. (2015). Le statut épistémologique de l'expérience dans les nouvelles approches préconisées pour l'enseignement des sciences. (12), 59-85. Récupéré sur <http://journals.openeditions.org/RDST/1132>
- Chartré, C., & Levert, I. (2008). *Synergie, Science et technologie, Applications technologiques et scientifiques, 2^e cycle, 1^{re} année, Manuel de l'élève*. Montréal (Québec): Chenelière Éducation.
- Chartré, C., & Levert, I. (2011). *Synergie, Guide d'enseignement, 2^e cycle du secondaire, 1^{re} année*. Montréal: TC Média Livres (Chenelière Éducation).
- Chiappetta, E. L. (1993). Do middle school life science textbooks provide a balance of scientific literacy themes. *Journal of Research in Science Teaching*, *30*(7), pp. 787-797.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools : A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, *86*, pp. 175-218.
- Clement, J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, *22*(9), pp. 1041-1053.

- Clement, J. J. (1989). Learning via model construction and criticism: Protocole evidence on sources of creativity in science. Dans J. A. Glover, R. R. Ronning, & R. C. R., *Handbook of creativity* (pp. 341-381). New York, : NY: Plenum.
- Conseil de la science et de la technologie. (2002). *La culture scientifique et technologique au Québec : Bilan*. Ste-Foy (Québec) : Gouvernement du Québec.
- Conseil des ministres de l'Éducation. (2008). *PPCE-13 : Rapport de l'évaluation des élèves de 13 ans en mathématiques, en sciences et en lecture*. Toronto : Conseil des ministres de l'éducation.
- Conseil des ministres de l'Éducation. (2013). *À la hauteur : Résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE. Le rendement des jeunes du Canada en mathématiques, en lecture et en sciences. Premiers résultats de 2012 pour les jeunes de Canada âgés de 15 ans*. Toronto (Ontario).
- Conseil des ministres de l'Éducation. (2018). *PPCE 2016, Rapport de l'évaluation pancanadienne en lecture, en mathématiques et en sciences*. Toronto.
- Conseil des ministres de l'Éducation. (2018). *PPCE 2016. Rapport de l'évaluation pancanadienne en lecture, en mathématiques et en sciences*. Toronto (Ontario).
- Conseil des ministres de l'Éducation. (2019). *À la hauteur : Résultats canadiens de l'étude PISA 2018 de l'OCDE. Le rendement des jeunes de 15 ans du Canada en lecture, en mathématiques et en sciences*. Toronto (Ontario).
- Conseil des ministres de l'Éducation. (2019). *À la hauteur : Résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE*. Toronto.
- Conseil supérieur de l'éducation. (2013). *L'enseignement de la science et de la technologie au primaire et au premier cycle du secondaire*. Québec : Gouvernement du Québec.
- Cowan, N., Dumont, P., Fournier, N., & Trottier, D. (2013). *Univers, L'essentiel, Cahier de savoirs et d'activités, 1^{re} secondaire*. Montréal (Québec): Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.
- Cowan, N., Dumont, P., Fournier, N., & Trottier, D. (2013). *Univers, L'essentiel, Cahier des savoirs et d'activités, 2^e secondaire*. Montréal (Québec): Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.
- Cyr, M.-D., & Verrault, J.-S. (2014). *L'essentiel 3, Collection Observatoire, Cahier de savoirs et d'activités, Programme ST et ATS*. Montréal (Québec): Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.
- Cyr, M.-D., & Verreault, J.-S. (2007). *Observatoire - L'humain, Manuel de l'élève, 1^{re} année du 2^e cycle du secondaire*. ERPI.
- Cyr, M.-D., Verreault, J.-S., & Forget, D. (2008). *Observatoire - L'environnement, Manuel de l'élève, 2^e année du 2^e cycle du secondaire*. ERPI.
- de Vos, W., & Verdonk, A. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of research in science teaching*, 33(6), 657-664.
- Deese, W. C., Ramsey, L. L., Walczyk, J., & Eddy, D. (2000). Using demonstration assessments to improve learning. *Journal of Chemical education*, 77(11), 1511-1520.
- Denzin, N. K. (1978). *The research act : A theoretical introduction to sociological methods*. New York: McGraw-Hill.

- Dercourt, J., Paquet, J., Thomas, P., & Langlois, C. (2006). *Géologie. Objet, méthodes et modèles*. (Dunod, Éd.)
- DfES. (2002). *Framework for teaching science: Years 7, 8 and 9. Key Stage 3 National Strategy*. London: Department of Education and Skills.
- Dion-Viens, D. (2012, 10 septembre). Taux d'échec alarmant à l'examen de sciences du Ministère. *Le Soleil*.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R., & Scott, P. (1996). *Young people's image of science*. Buckingham : Open University Press.
- Driver, R., Newton, P., & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education, 84*, pp. 287-312.
- Duarte, A. M. (2007). Conceptions of learning and approaches to learning in Portuguese students. *Higher Education, 54*, pp. 781-794.
- Duschl, R. A. (1990). *Restructuring science education : The importance of theories and their development*. New York : Teachers College Press.
- Duschl, R. A., Schweingruber, H. A., & A., S. (2007). *Taking science to school : learning and teaching science in grade K-8*. Washington: D. C. : National Academy Press.
- Escrivà, I., Gagnon, J., & Richer, J.-S. (2016). *Conquête, Cahier d'apprentissage, Guide corrigé, 1er cycle, 2e secondaire*. Montréal (Québec): Éditions Chenelière Éducation.
- Escrivà, I., Gagnon, J., & Richer, J.-S. (2016). *Conquêtes, Cahier d'apprentissage, Guide-corrigé, 1re secondaire*. Montréal (Québec): Chenelière Éducation.
- Escriva, I., Gagnon, J., & Richer, J.-S. (2017). *ADN, 2e Édition, Cahier d'apprentissage, Savoirs et activités, 3e secondaire*. Montréal: TC Média Livres Inc. (Chenelière Éducation).
- Escrivà, I., Gagnon, J., & Richer, J.-S. (2018). *ADN, Guide-corrigé, 3e secondaire*. Montréal (Québec): Éditions Chenelière Éducation.
- Escrivà, I., Ouellette, C., Pinsonnault, D., Zarif, M., & Khanh-Thanh, T. (2005). *Explorations, Science et technologie, 1er cycle du secondaire, Manuel A*. Montréal (Québec): Chenelière Éducation.
- Fink, A. (2020). *Conducting Research Literature Reviews : From Internet to Paper*. Los Angeles: Sage.
- Fortin, M.-F., & Gagnon, J. (2016). *Fondements et étapes du processus de recherche Méthodes quantitatives et qualitatives*. Montréal: Chenelière Éducation.
- Fortman, J. J. (1993). Applications and analogies. *Journal of Chemical Education, 70*(1), 56-57.
- Fortus, D., Shwartz, Y., & Rosenfeld, S. (2016). High school student's meta-modeling knowledge. *Research in Science Education, 46*, 787-810.
- Franco, A. G., & Taber, K. S. (2009). Secondary Students' Thinking about Familiar Phenomena : Learners' explanations from a curriculum context where 'particules' is a key idea for organising teaching and learning. *International Journal of Science Education, 31*(14), 1917-1952.
- Frigg, R., & Hartmann, S. (2012). Models in science. Dans E. N. Zalta, *The Stanford encyclopedia of philosophy*.
- Gabel, D. (2005). Enhancing students' conceptual understanding of chemistry through integrating the macroscopic, particle, and symbolic representations of matter. *Chemists' Guide to Effective Teaching*, pp. 77-88.

- Gabel, D., & Sherwood, R. (1980). The effect of student manipulation of molecular models on chemistry achievement according to Piagetian level. *Journal of Research in Science Teaching*, 17(1), 75-78.
- Gagnon, Y.-C. (2012). *L'étude de cas comme méthode de recherche* (éd. 2). Québec: Les Presses de l'Université du Québec.
- Garcia, K. S., & Taber, A. G. (2009). Secondary students' thinking about familiar phenomena : Learners' explanations from a curriculum context where "particles" is a key idea for organising teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 31(14), 1917-1952.
- Gauthier, D. (1998). *La modélisation mathématique dans l'enseignement de la chimie des gaz à des élèves de la cinquième année du secondaire*. Montréal: Université de Montréal.
- Genzling, J.-C. (1988). Les modèles particuliers. *ASTER Modèles et modélisation*(7), 53-70.
- Giere, R. N. (1991). *Understanding scientific reasoning* (éd. 3). Forth Worth, TX: Rinehart & Winston.
- Gilbert, J. K. (1997). *Exploring models and modeling in science education and technology education*. England: The University of Reading.
- Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). *Modelling-based teaching in science education*. Springer.
- Gogolin, S., & Kruger, D. (2018). Students' understanding of the nature and purpose of models. *Journal of Research in Science Teaching*, 55, 1313-1338.
- Gray, R., & Rogan-Klyve, A. (2018). Talking modelling : examining secondary science teachers' modelling-related talk during a model-based inquiry unit. *International Journal of Science Education*, 40(11), 1345-1366.
- Griffiths, A. K., & Preston, K. R. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(6), pp. 611-628.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. (1991). Understanding models and their use in science conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 799-822.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science & Education*, 16, 653-697.
- Haslam, C. Y., & Hamilton, R. J. (2010). Investigating the use of integrated instructions to reduce the cognitive load associated with doing practical work in secondary school science. *International Journal of Science Education*, 32(13), 1715-1737.
- Hasni, A. (2010). Modèles et modélisation en enseignement scientifique : quelques aspects prioritaires à considérer. *Spectre*, 1(40), 10-13.
- Hasni, A., & Lebeaume, J. (2010). L'enseignement scientifique et technologique : nouvelles orientations curriculaires, nouveaux défis. Dans A. Hasni, & J. Lebeaume, *Enjeux contemporains de l'éducation scientifique et technologique* (pp. 1-16). Ottawa: Les Presses de l'Université d'Ottawa.
- Hasni, A., Lenoir, Y., & Lebeaume, J. (2006). L'enseignement des sciences et des technologies : enjeux et regards sur la formation enseignante. Dans A. Hasni, Y. Lenoir, & J. Lebeaume, *La formation à l'enseignement des sciences et des technologies au*

- secondaire. Dans le contexte des réformes par compétences (pp. 3-8). Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Hasni, A., Morisoli, C., Samson, G., & Owen, M.-E. (2009). Points de vue d'enseignants de sciences au premier cycle du secondaire sur les manuels scolaires dans le contexte de l'implantation des nouveaux programmes au Québec. *Revue des sciences de l'éducation*, 35(2), pp. 83-105.
- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*. New York: Free Press.
- Henze, I., van Driel, J. H., & Verloop, N. (2007). Science Teachers' Knowledge about teaching models and modelling in context of a new syllabus on public understanding of science. *Research in Science Education*, 37, 99-122.
- Ho, H.-N. J., & Liang, J.-C. (2015). The relationships among scientific epistemic beliefs, conceptions of learning science, and motivation of learning science: A study of Taiwan high school students. *International Journal of Science Education*, 37(16), pp. 2688-2707.
- Hodson, D. (1992a). Assessment of practical work : some considerations in philosophy of science. *Science and Education*, 1, pp. 115-144.
- Hodson, D. (1992b). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 14, pp. 541-562.
- Hodson, D. (1993). « Against skills-based testing in science ». *Curriculum Studies*, 1, pp. 127-148.
- Hodson, D. (2006). Pour une approche plus critique du travail pratique en science à l'école. Dans A. Hasni, Y. Lenoir, & J. Lebeaume, *La formation à l'enseignement des sciences et des technologies au secondaire. Dans le contexte des réformes par compétences* (pp. 59-95). Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Hodson, D. (2014). Learnin science, learning about science, doing science : different goals demand different learning methods. *International Journal of Science Education*, 36(15), 2534-2553.
- Hofer, B., & Pintrish, P. (1997). The development of epistemological theories : Beliefs about knowledge and knowing and their relation to learning. *Review of Educational Research*, 67, 88-140.
- Ingram, A. M., & Gilbert, J. K. (1991). The use of analogue models by students of chemistry at higher educational level. *International Journal of Science Education*, 13(2), 193-202.
- Jaber, L. Z., & Boujaoude, S. (2012). A Macro-micro-symbolic teaching to promote relational understanding of chemical reactions. *International Journal of Science Education*, 34(7), 973-998.
- Jackman, L. E., Mollenberg, W. P., & Brabson, G. D. (1987). Evaluation of three instructional methods for teaching general chemistry. *Journal of Chemical Education*, 82(6), 937-943.
- Johnson, P. (1998). Progression in children's understanding of a 'basic' particle theory: a longitudinal study. *International Journal of Science Education*, 20(4), pp. 393-412.

- Johnson, P. (2013). How students' understanding of particle theory develops : a learning progression. Dans G. Tsapalis, & H. Sevian, *Concepts of matter in science education* (p. 61). New-York: Springer.
- Johnson, P., & Tymms, P. (2011). The emergence of a learning progression in the middle school chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, 48, pp. 849-877.
- Johnson-Laird, P. N. (1998). *Mental models. In Foundations of cognitive science.* (éd. M. I.). Cambridge: MIT Press.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and micro-chemistry. *School Science Review*, 64, 377-379.
- Johnstone, A. H. (1990). Fashion fads and facts in chemistry education. *Paper presented in American Chemical Society meeting, Washington, DC.*
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom like they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7, pp. 75-83.
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry. *Journal of Chemical Education*, 70(9), pp. 701-705.
- Johnstone, A. H. (1997). Chemistry teaching science or alchemy. *Journal of Chemical Education*, 74(3), 262-268.
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry: Logical or psychological? *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 1(1), 9-15.
- Jonnaert, P. (2015). Vers une problématisation des assises d'une théorie curriculaire. *Linguarum Arena*, 6, 9-28.
- Jonnaert, P., Ettayebi, M., & Defise, R. (2009). *Curriculum et compétences : un cadre opérationnel.* Bruxelles: De Boeck.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling teachers' views of the nature of modelling and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), pp. 369-387.
- Karakolidis, A., Pitsia, V., & Emvalotis, A. (2019). The case of high motivation and low achievement in science : what is the role of student' s epistemic beliefs? *International Journal of Science Education*, 41(11), 1457-1474.
- Karsenti, T., & Savoie-Zajc, L. (2018). *La recherche en éducation Étapes et approches.* Montréal: Les Presses de l'Université de Montréal.
- Kozma, R. B., & Russell, J. (1997). Multimedia and understanding: expert and novice responsesto different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(9), pp. 949-968.
- Krajcik, J. S. (1989). *Paper presented at the American Anthropological Association.* Washington: DC.
- Krajcik, J., Drago, K., & Sutherland, L. A. (2012). The promise and value of learning progression research. Dans S. Bernholt, P. Nentwig, & K. Neumann, *Making it tangible - Learning outcomes in science education* (pp. 261-284). Munster: Waxmann.
- Lebeaume, J., Zaid, A., & Magneron, N. (2020). Recherches en didactique des sciences et des technologies. *Sciences et technologies : contenus et curricula.* Récupéré sur <http://journals.openedition.org/rdst/2973>

- Lederman, N. (2007). Nature of science: Past, present, and future. Dans I. S. Abell, & N. G. Lederman, *Handbook of research on science education* (pp. 831-879). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Lederman, N. G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), pp. 331-359.
- Lehrer, R., & Schuabert, L. (2003). Origins and evaluation of model-based reasoning in mathematics and science. Dans R. Lesh, & H. M. Doerr, *Beyond constructivism : Models and modelling perspectives on mathematics resolving problems, learning and teaching* (pp. 59-70). Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lehrer, R., & Schuabert, L. (2006). Cultivating model-based reasoning in science education. Dans R. K. Sawyer, *Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 371-387). West Nyack, NY, USA: Cambridge University Press.
- Liang, J. C., & Tsai, C. C. (2010). Relational analysis of college science-major students' epistemological beliefs toward science and conceptions of learning science. *International Journal of Science Education*, 32(17), 2273-2289.
- Lin, C.-L., Tsai, C.-C., & Liang, J. -C. (2012). An Investigation of two profiles within conceptions of learning science : An examination of confirmatory factor analysis. *European Journal of Psychology of Education*, pp. 499-521.
- Lincoln, Y. S. (1985). *Naturalistic inquiry*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Martinand, J.-L., Astolfi, J.-P., Chomat, A., Drouin, A.-M., Genzling, J.-C., Larcher, C., . . . Weil-Barais, A. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris.
- Martinand, J.-L., Genzling, J.-C., Pierrard, M.-A., Larcher, C., Orange, C., Rumelhard, G., . . . Lemeignan, G. (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Institut National de Recherche Pédagogique.
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Meirieu, P. (1989). *Apprendre, oui, mais comment ?* Paris: ESF.
- Merriam, S. B. (2015). *Qualitative research A guide to design and implementation*. San Francisco: Jossey-Bass.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2006). *Programme de formation de l'école québécoise, Enseignement secondaire, premier cycle*. Québec, Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2007). *Programme de formation de l'école québécoise, Science et technologie, 2^e cycle du secondaire*. Québec, Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2011). *La progression des apprentissages au secondaire, Science et technologie 1^{er} cycle, Science et technologie 2^e cycle, Science et technologie de l'environnement*. Québec, Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2011). *Cadre d'évaluation des apprentissages, Science et technologie, Science et technologie de l'environnement, Enseignement secondaire, 2^e cycle*. Québec, Gouvernement du Québec.
- Morell, L., Collier, T., Black, P., & Wilson, M. (2017). A construct-modeling approach to develop a learning progression of how students understand the structure of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(8), pp. 1024-1048.

- Muis, K. R. (2007). The role of epistemic beliefs in self-regulated learning. *Educational Psychologist*, 42(3), 173-190.
- Nakhleh, M., & Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving. *Journal of Chemical Education*, 70(3), pp. 190-192.
- Niclot, D. (2012). La problématisation de la géographie scolaire à travers les introductions de manuels scolaires de 1998 et de 2008. *Nouveau cahier de la recherche en éducation*, 15(1), pp. 51-67. Récupéré sur <https://doi.org/10.7202/1013379ar>
- Noh, T., & Scharmann, L. C. (1997). Instructional influence of a molecular-level pictorial presentation of matter on students' conceptions and problem-solving ability. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(2), 199-217.
- Norman, O. (1997). Investigating the nature of formal reasoning in chemistry: Testing Lawson's multiple hypothesis theory. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(10), 1067-1981.
- Novick, S., & Nussbaum, J. (1981). Pupils' Understanding of the Particulate Nature of Matter: A Cross-Age Study. *Science Education* 65 (2), pp. 187-196.
- Office de la qualité et de la responsabilité en éducation. (2014). *Programme pancanadien d'évaluation (2013)*. Toronto.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
- Orange, C. (1997). *Problème et modélisation en biologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Orange, C. (2012). *Enseigner les sciences*. Bruxelles: de boeck.
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation : a necessary distinction? *Science Education*, 95, pp. 627-638.
- Osborne, R. J., & Cosgrove, M. M. (1983). Children's conceptions of the changes of state of water. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(9), pp. 825-838.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: a dual coding approach*. New York, NY: Wiley.
- Penner, D. E., Giles, N. D., Lehrer, R., & Schauble, L. (1997). Building functional models: Designing an elbow. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(2), 125-143.
- Perrenoud, P. (1993). Curriculum : le formel, le réel, le caché. Dans J. Houssaye, *La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui* (pp. 61-76). Issy-les-Moulineaux: ESF-Éditeur.
- Pinch, K. J. (2009). The importance of evaluative research. *Journal of Experiential Education*, 31(3), 390-394.
- Pizzini, E. L. (1991). The inquiry level of junior high activities : Implication to science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(2), pp. 111-121.
- Popper, K. (1991). *La connaissance objective*. Paris: Aubier.
- Portides, D. P. (2007). The relation between idealisation and approximation in scientific model construction. *Science & Education*, 16, pp. 699-724.
- Potvin, P. (2018). *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école*. Québec: Les Presses de l'Université de Laval.
- Pullman, B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Fayard.
- Raynal, F., & Rieunier, A. (2014). *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés Apprentissage, formation, psychologie cognitive*. Issy-les--Moulineaux cedex: ESF éditeur.

- Reif, F., & Larkin, J. H. (1991). Cognition in scientific and everyday domains: Comparison and Learning implications. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), pp. 733-760.
- Robardet, G., & Guillaud, J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris (France): Presses Universitaires de France.
- Roy, P., & Hasni, A. (2014). Les modèles et la modélisation vue par des enseignants de sciences et technologie du secondaire au Québec. *Revue des sciences de l'éducation de McGill*, 49(2), pp. 349-371.
- Rubba, P., & Andersen, H. (1978). Development of an instrument to assess secondary students' understanding of the nature of scientific knowledge. *Science Education*, 62(4), pp. 449-458.
- Ryan, A. G., & Aikenhead, G. S. (1992). Students' preconceptions about the epistemology of science. *Science Education*, 76(6), pp. 559-580.
- Saljo, R. (1979). *Learning in learner's perspective I: Some commonsense conceptions*. Gothenburg, Sweden: Institut of Education, University of Gohenburg.
- Samson, G. (2007). Enseigner les sciences en intégrant les mathématiques et ainsi favoriser le transfert des apprentissages. Dans P. Potvin, M. Riopel, & S. Masson, *Enseigner les sciences : regards multiples* (pp. 411-426). Québec: MultiMondes.
- Sandoval, W. A. (2005). Understanding students' practical epistemologies and their influence on learning through inquiry. 89(4), pp. 634-656.
- Sandoval, W. A., & Morrison, K. (2003). High school students' ideas about theories and theory change after a biological inquiry unit. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(4), pp. 369-392.
- Sanger, M. J. (2000). Using particulate drawings to determine and improve students' conceptions of pure substances and mixtures. *Chemical Education Research*, 77(6), pp. 762-766.
- Sanger, M. J. (2009). Computer animations of chemical processes at the molecular level. *Chemist's Guide to Effective Teaching*, 198-211.
- Santerre. (2006). La part de l'école dans le développement d'une culture scientifique et technique. Dans A. Hasni, Y. Lenoir, & J. Lebeaume, *La formation à l'enseignement des sciences et technologies au secondaire*. Québec: Presse de l'Université du Québec.
- Savoie-Zajc, L. (2019). Les pratiques des chercheurs liées au soutien de la rigueur dans leur recherche : une analyse d'articles de recherches qualitatives parus entre 2010 et 2017. *Recherches qualitatives*, 38(1), pp. 32-52.
- Schauble, L., Glaser, R., Duschl, R. A., Schulze, S., & John, J. (1995). Students' understanding of the objectives and procedures of experimentation in the science classroom. *Journal of the Learning Sciences*, 4(2), pp. 131-166.
- Schmidt, W. H., & Wang, H. C. (2005). Curriculum coherence: an examination of US mathematics and science content standards from an international perspective. *Journal of Curriculum Studies*, 37(5), 525-559.
- Schwartz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling knowledge : developing students' understanding or scientific modeling. *Cognition ans Instruction*, 23(2), pp. 165-205.
- Schwartz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., . . . Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling : Making scientific modeling

- accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Smith, C. L., Wiser, M., Anderson, C. W., & Krajcik, J. (2006). Implication of research on children's learning for standards and assessment : a proposed learning progression for matter and the atomic-molecular theory. *Measurement : Interdisciplinary Research and Perspectives*, 4(1-2), pp. 1-98.
- Stain, M., & Talenquer, V. (2007). Classification of chemical substances using representations of matter : An analysis of student thinking. *International Journal of Science Education*, 29(5), pp. 643-661.
- Stavridou, H., & Solomonidou, C. (1998). Conceptual reorganization and the construction of the chemical reaction concept during secondary education. *International Journal of Science Education*, 20(2), pp. 205-221.
- Stevens, S. Y., Delgado, C., & Krajcik, J. (2010). Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter. *Journal of Research in Science Education*, 47(6), 687-715.
- Stevens, S., & Sutherland, L. a. (2009). *The big ideas of nanoscale science and engineering*. VA: National Teacher Association Press.
- Summers, R., Alameh, S., Brunner, J., Maddux, J. M., Wallon, R. C., & Abd-El_Khalick, F. (2019). Representations of nature of science in US science standards : a historical account with contemporary implications. *Journal of Research in Science Teaching*, 56, pp. 1234-1268.
- Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progression: the case of structure of matter. *International Journal of Science Education*, 31(15), pp. 2123-2136.
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many face of the chemistry triplet. *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Talley, L. H. (1973). The use of three-dimensional visualisation as a moderator in the higher cognitive learning of concepts in college level chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, 10(3), 263-269.
- Tasker, R. (2005). Using multimedia to visualize the molecular world: educational theory into practice. *Chemists' Guide to Effective Teaching*, 195-211.
- Thouin, M. (2014). *Réaliser une recherche en didactique*. MultiMondes.
- Thouin, M. (2017). *Enseigner les sciences et les technologies au préscolaire et au primaire*. Montréal (Québec): MultiMondes.
- Thouin, M. (2017). L'épistémologie et la recherche en didactique Les visées des sciences et des modèles. *Revue canadienne des jeunes chercheuses et chercheurs en éducation*, 8(1), pp. 107-115.
- Thouin, M. (2019). *Résoudre des problèmes scientifiques et technologiques au préscolaire et au primaire*. Montréal Québec: MultiMondes.
- Tsai, C.-C. (2004). Conceptions of learning science among high school students in Taiwan: A phenomenographic analysis. *International Journal of Science Education*, 26, pp. 1733-1750.
- Van der Maren, J.-M. (1996). *Méthodes de recherche pour l'éducation (2^e édition)*. Montréal: Presses de l'Université de Montréal.

- Van Driel, J. H., & Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modelling in science. *International Journal of Science Education*, 21(11), pp. 1141-1153.
- Van Driel, J. H., & Verloop, N. (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. *International Journal of Science Education*, 24(12), pp. 1255-1272.
- Vermersch, P. (2000). *L'entretien d'explicitation*. Issy-les-Moulineaux: Collection Pédagogies ESF éditeur.
- Vidal, B. (1985). *Que sais-je ? Histoire de la chimie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris: Éditions du Seuil.
- Wells, M., Hestenes, D., & Swackhamer, G. (1995). A modelling method for high school physics instruction. *American Journal of Physics*, 63, 606-619.
- Williams, G., & Clement, J. (2015). Identifying multiple levels of discussion-based teaching strategies for constructing scientific models. *International Journal of Science Education*, 37(1), 82-107.
- Williamson, V. M. (2008). The particulate nature of matter: an example of how theory-based research can impact the field. *American Chemical Society Symposium Series*, 976, pp. 67-78.
- Williamson, V. M., & Abraham, M. R. (1995). The effects of computer animation on the particulate mental models of college chemistry students. *Journal of research in science teaching*, 32(5), 521-534.
- Williamson, V. M., & Jose, T. J. (2009). Using visualization techniques in chemistry teaching. *Chemists' Guide to Effective Teaching*, 2, 71-88.
- Wilson, L. (1954). A study of opinions related to the nature of science and its purpose in society. *Science Education*, 38(2), pp. 159-164.
- Wu, H., Krajcik, J. S., & Soloway, E. (2001). Promoting understanding of chemical representations: students' use of a visualisation tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 821-842.
- Yeziarski, E. J., & Birk, J. P. (2006). Misconceptions about the particulate nature of matter using animation to close the gender gap. *Journal of Chemical Education*, 83(6), 954-960.
- Zhang, Z. H., & Linn, M. C. (2011). Can generating representations enhance learning with dynamic visualisations. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(10), 1177-1198.

Annexe 1 : La progression des apprentissages du modèle particulière selon Smith et coll.

(Smith, Wisser, Anderson, et Krajcik, 2006)

Questions & Big Ideas	Components of Big Ideas	K-2 Elaboration of Big Ideas	3-5 Elaboration of Big Ideas	6-8 Elaboration of Big Ideas
<p>1. What are things made of and how can we explain their properties?</p> <p>1. Objects¹ are constituted of matter, which exists as many different material kinds. Objects have properties that can be measured and depend on amount of matter and on the material kinds they are made of.</p>	<p>Existence of matter and diversity of material kinds</p>	<p>Objects are made of specific materials.</p> <p>There are different kinds of materials.</p> <p>The same kind of object can be made of different materials.</p>	<p>Objects are made of matter that takes up space and has weight.</p> <p>Solids, liquids, and air are forms of matter and share these general properties.</p> <p>There can be invisible pieces of matter (too small to see).</p> <p>There are many different kinds of materials.</p>	<p>Matter has mass, volume, and weight (in a gravitational field), and exists in three general phases, solids, liquids, and gas.</p> <p>Materials can be elements, compounds, or mixtures.</p> <p>1AM. All matter is made of a limited number of different kinds of atoms, which are commonly bonded together in molecules and networks. Each atom takes up space, has mass, and is in constant motion.</p>
	<p>Objects have properties that can be measured and explained. Three important properties are mass, weight, and volume.</p>	<p>Objects have certain properties—weight, length, area, and volume— that can be described, compared and measured. (Only preliminary exploration and construction of volume measurement at this time.)</p>	<p>Weight is an additive property of objects that can be measured (e.g., the weight of an object is the sum of the weight of its parts).</p> <p>Volume is an additive property of an object that can be measured.</p> <p>The weight of an object is a function of its volume and the material it is made of.</p>	<p>Mass is a measure of amount of matter and is constant across location; weight is a force, proportional to mass and varies with gravitational field.</p> <p>Solids, liquids, & gases have different properties.</p> <p>1AM. The mass and weight of an object is explained by the masses and weights of its atoms. The different motions & interactions of atoms in solids, liquids, and gases help explain their different properties.</p>
	<p>Material kinds have characteristic properties that can be measured and explained.</p>	<p>The properties of materials can be described and classified. (Only readily observable properties, such as color, hardness, flexibility, are investigated at this time.)</p>	<p>Materials have characteristic properties that are independent of the size of the sample.</p> <p>(Extends knowledge to less obvious properties such as density, flammability, or conductivity at this time)</p>	<p>Materials have characteristic properties independent of size of sample (Extends knowledge to include boiling/freezing points and to elaborate on density)</p> <p>1AM. The properties of materials are determined by the nature, arrangement and motion of the molecules that they are made of.</p>

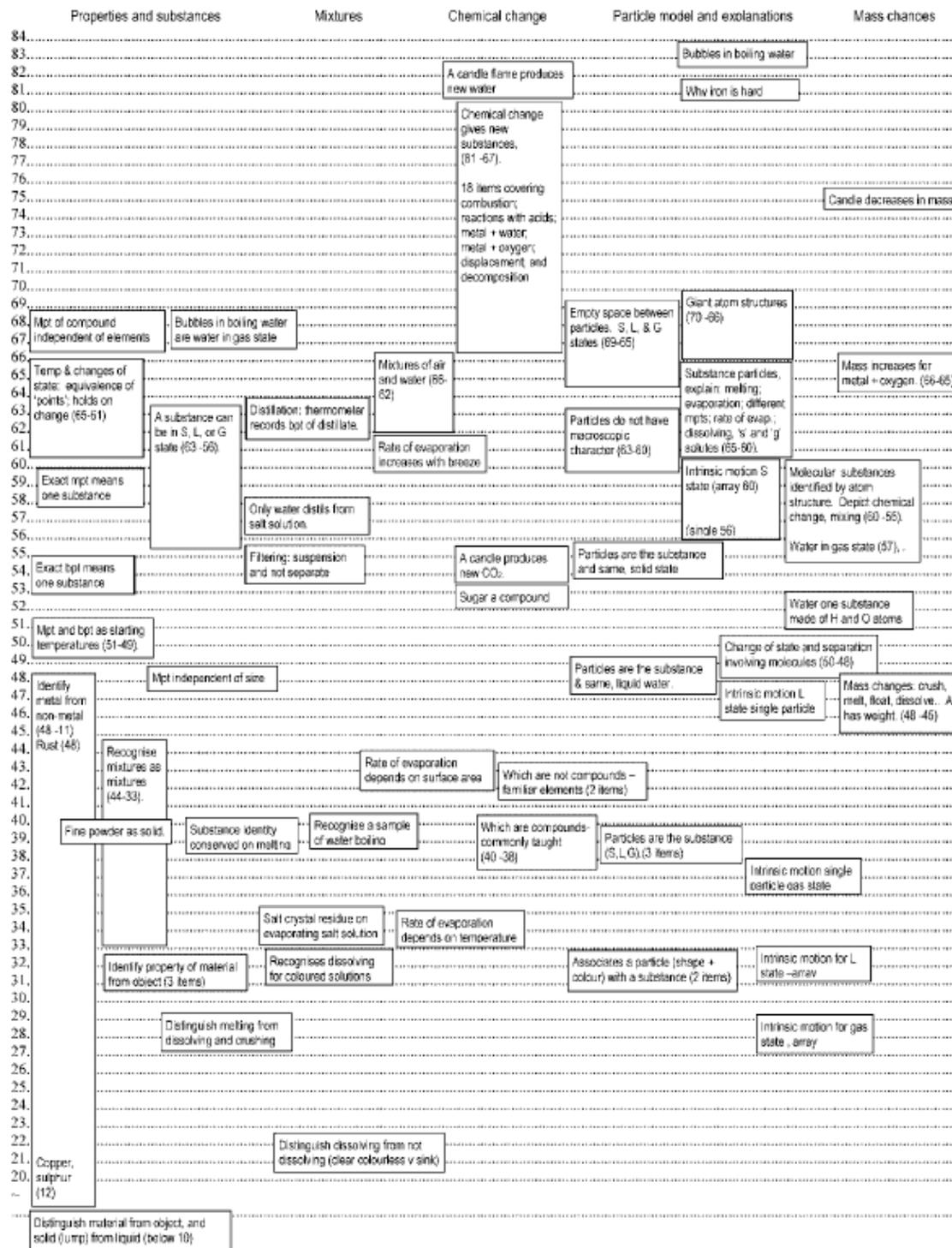
¹ As mentioned in the text, we use the term object in the broad sense to refer to any bounded material entity, not just solids.

<i>Questions & Big Ideas</i>	<i>Components of Big Ideas</i>	<i>K-2 Elaboration of Big Ideas</i>	<i>3-5 Elaboration of Big Ideas</i>	<i>6-8 Elaboration of Big Ideas</i>
<p>2. What changes and what stays the same when things are transformed?</p> <p>2. Matter can be transformed, but not created or destroyed, through physical and chemical processes.</p>	<p>Mass and weight are conserved across a broad range of transformations.</p>	<p>There are some transformations (e.g., reshaping, breaking into pieces) where the amount of stuff and weight is conserved despite changes in perceptual appearance.</p>	<p>Matter continues to exist when broken into pieces too tiny to be visible.</p> <p>Amount of matter and weight are conserved across a broader range of transformations (e.g., melting, freezing, and dissolving.)</p>	<p>Mass and weight (but not volume) are conserved across chemical changes, dissolving, phase change & thermal expansion.</p> <p>2AM: Mass and weight are conserved in physical and chemical changes because atoms are neither created nor destroyed.</p>
	<p>Material kinds stay the same across some transformations and change across others.</p>	<p>Material kind stays the same when objects are reshaped or broken into small pieces.</p> <p>Freezing and melting changes some properties of materials but not others.</p>	<p>Materials can be changed from solid to liquid (and vice versa) by heating (or cooling) but are still the same kind of material.</p> <p>Combining two or more materials can produce a product with properties different from those of the initial materials.</p>	<p>Some transformations involve chemical change (e.g., burning, rusting) in which new substances, as indicated by their different properties, are created.</p> <p>In other changes (e.g., phase change, thermal expansion) materials may change appearance but the substances in them stay the same.</p> <p>2AM: In chemical changes new substances are formed as atoms are rearranged into new molecules. The atoms themselves remain intact.</p> <p>2AM: In physical changes, molecules change arrangement and/or motion but remain intact, so the chemical substance remains the same.</p>

<i>Questions & Big Ideas</i>	<i>Components of Big Ideas</i>	<i>K-2 Elaboration of Big Ideas</i>	<i>3-5 Elaboration of Big Ideas</i>	<i>6-8 Elaboration of Big Ideas</i>
<p>3. How do we know?</p> <p>3. We can learn about the world through measurement, modeling, and argument.</p>	<p>Good measurements provide more reliable and useful information about object properties than common sense impressions.</p>	<p>Measurement involves comparison.</p> <p>Good measurements use iterations of a fixed unit (including fractional parts of that unit) to cover the measured space completely (no gaps).</p> <p>Measurements are more reliable than common sense impressions.</p>	<p>Although measurements are more reliable than common sense impressions, measurements can be more or less precise and there is always some measurement error.</p> <p>Instruments, such as microscopes, can extend our ability to observe and measure.</p>	<p>Our senses respond to combinations of physical properties, rather than isolated ones. For this reason, they are not good measures of those physical properties.</p> <p>Sources of measurement error can be examined and quantified.</p> <p>We can learn about the properties of things through indirect measurement (e.g., water displacement) as well as using powerful tools (microscopes).</p> <p>3AM. Atoms are too small to see directly with commonly available tools.</p>
	<p>Modeling is concerned with capturing key relations among ideas rather than surface appearance.</p>	<p>Some properties of objects can be analyzed as the sum of component units. (Students are involved with the implicit modeling of extensive quantities through the creation of measures).</p>	<p>Graphs, visual models, simple algebraic formulas or quantitative verbal statements can be used to represent inter-relations among variables and to make predictions about one variable from knowledge of others.</p>	<p>Models can propose unseen entities to explain a pattern of data.</p> <p>3AM: The properties of and changes in atoms and molecules have to be distinguished from the macroscopic properties and phenomena for which they account.</p>
	<p>Arguments use reasoning to connect ideas and data.</p>	<p>Ideas can be evaluated through observation and measurement.</p>	<p>Hypotheses and data are distinct.</p> <p>We make stronger arguments for our ideas when they fit a pattern of data rather than simply one observation.</p> <p>We can clarify our ideas by more precisely stating the conditions under which they are true.</p>	<p>Good arguments involve getting data that helps distinguish between competing explanations.</p> <p>3AM. We learn about properties of atoms and molecules indirectly, using hypothetico-deductive reasoning.</p>

Annexe 2 : La progression des apprentissages du modèle particulaire selon Johnson et Tymms

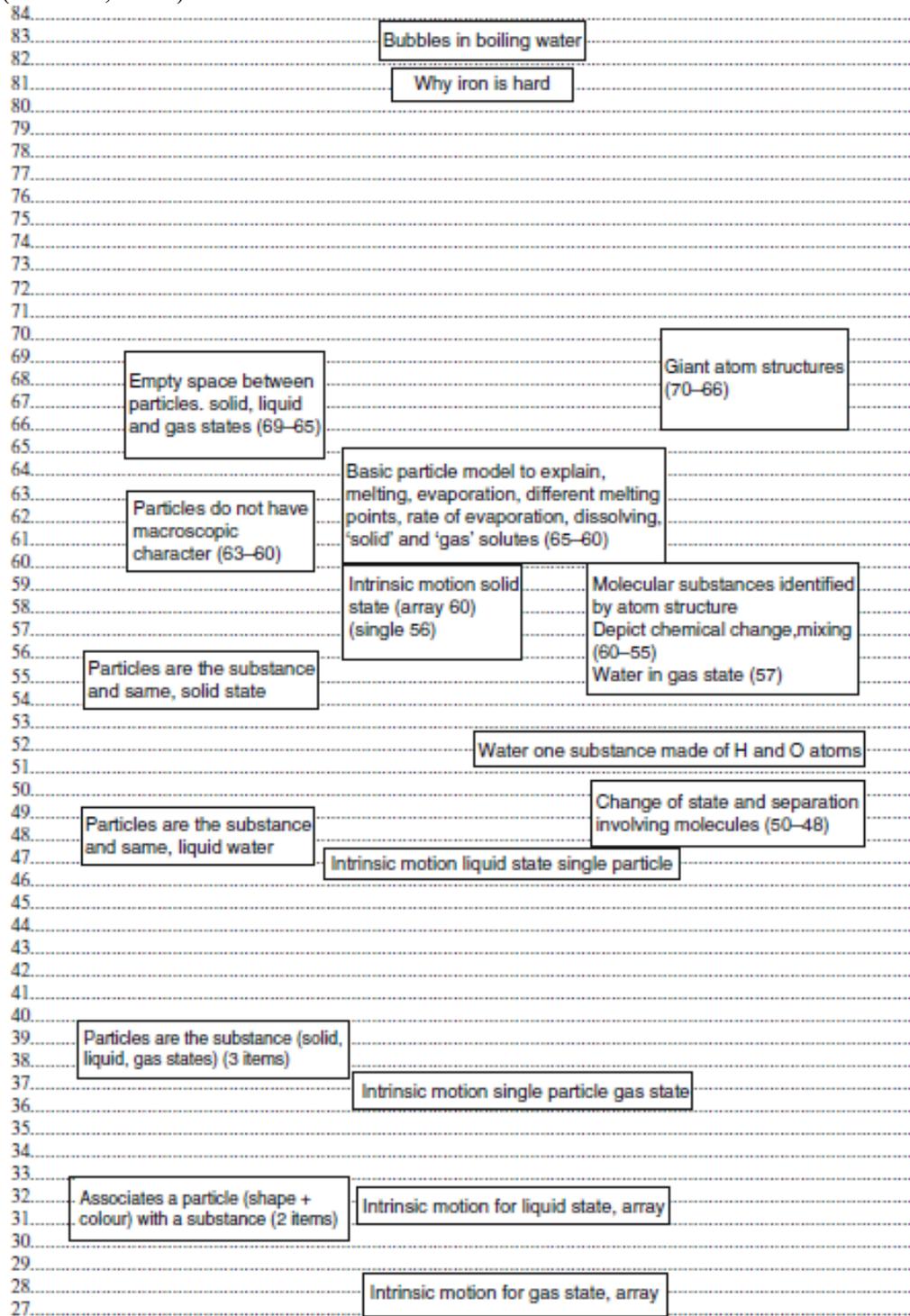
(Johnson et Tymms, 2011, p. 869)



La progression de l'annexe 2 se lit de bas en haut. Les connaissances de base sur les phénomènes physiques et le début de la conception de la nature particulière des substances sont en bas de la ligne 44. Entre les lignes 44 et 67, plusieurs notions deviennent accessibles : 1- la notion de substance (pure) se développe au moyen des points de fusion et d'ébullition; 2- la notion des trois états (gazeux, liquide et solide) des substances; 3- la notion de mélange. À partir de la ligne 67, c'est la compréhension des changements chimiques qui commence.

Annexe 3 : La progression des apprentissages du modèle particulaire selon Johnson

(Johnson, 2013)



Annexe 4 : La technique de recension des écrits

La recension des écrits permet d'identifier, d'évaluer et de résumer les documents qui se rattachent aux questions de recherche (Fink, 2020). Notre recherche s'est effectuée essentiellement à partir de la base de données ERIC (Educational Resource Information Center) pour les documents écrits en anglais et Érudit pour ceux rédigés en français. Nous avons également utilisé le moteur de recherche Google pour obtenir les rapports du programme pancanadien d'évaluation, les résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE, les documents du curriculum formel (les programmes de formation de l'école québécoise, les progressions des apprentissages, les cadres d'évaluation). Pour compléter notre recherche numérique, des livres ont également été consultés.

La base de données ERIC est très conviviale. Elle a l'avantage de posséder un thésaurus très complet qui permet une recherche bibliographique plus systématique. L'utilisation du thésaurus nous a permis de générer, pour chaque terme précis que nous avons utilisé, les termes associés, génériques ou spécifiques. En sélectionnant les termes jugés appropriés, la base de données nous a généré des documents. Chacun d'eux est présenté au moyen du titre, des auteurs, de la source, du résumé et du nombre de citations. Ce dernier élément est intéressant, car, à notre avis, il peut être un indicateur de la qualité de l'article. En effet, nous pensons que plus un article est cité, plus il est pertinent. Évidemment, cela ne s'applique pas aux articles récents qui n'ont pas eu le temps d'être cités. Les citations dont ERIC donne accès nous ont permis de prendre connaissance des travaux ultérieurs à l'article, et ce, en plus des travaux antérieurs qui sont en références. En plus d'une recherche à partir des termes générés par le thésaurus, nous avons effectué des recherches par mots clés, par auteurs et par dates.

La base de données Érudit n'a pas de thésaurus, elle ne présente pas non plus le nombre de citation des documents. Cependant, elle est conviviale et elle a l'avantage de rassembler des documents rédigés en français. Pour l'interroger, nous avons utilisé des mots clés, des auteurs et parfois, des dates pour affiner la recherche.

Annexe 5 : Les manuels scolaires et les guides d'enseignements approuvés

1re année du 1er cycle du secondaire

Titre	Description	Éléments approuvés	Pages
Action, 1er cycle (1re partie) © 2005	Bouchard, R. et autres Lidec inc. <i>Action</i> Approuvé le 8 janvier 2007	Guide d'enseignement Manuel de l'élève	256

1er cycle du secondaire

Titre	Description	Éléments approuvés	Pages
Connexion: science-tech, 1er cycle © 2006	Banville, M. et autres Éditions Grand Duc <i>Connexion: science-tech</i> Approuvé le 19 juin 2007	Guides d'enseignement (4) Manuels de l'élève (2)	692
Explorations, 1er cycle © 2006	Khanh-Thanh, T. et autres Les Éditions de la Chenelière inc. Chenelière Éducation inc. (Publications Graficor) <i>Explorations</i> Approuvé le 10 juillet 2008	Guides d'enseignement © 2007 (5) Manuels de l'élève (2)	972
Galileo, 1er cycle © 2006	Chenouda, A., Dubreuil, M. Les Éditions CEC inc. <i>Galileo</i> Approuvé le 20 juin 2007	Guides d'enseignement © 2007 (6) Manuels de l'élève (3)	1042
Univers, 1er cycle © 2006	Lalonde, J. R. et autres Éditions du Renouveau pédagogique inc. <i>Univers</i> Approuvé le 26 avril 2007	Guides d'enseignement (4) Manuels de l'élève (2)	656

1re année du 2e cycle du secondaire

Titre	Description	Éléments approuvés	Pages
Biosphère, 1re année du 2e cycle © 2007	Dubreuil, M. et autres Les Éditions CEC inc. <i>Biosphère</i> Approuvé le 1 novembre 2010	Guides d'enseignement © 2008 (3) Manuels de l'élève (2)	520
Observatoire, 1re année du 2e cycle © 2007	Lalonde, J.R., Cyr, M.-D., Verreault, J.-S. Éditions du Renouveau pédagogique inc. <i>Observatoire</i> Approuvé le 24 avril 2008 Transcription en braille disponible :Commission scolaire des Premières-Seigneuries	Guides d'enseignement (2) Manuel de l'élève	450
Science-tech au secondaire - Un regard sur la vie, 1re année du 2e cycle © 2007	Schepper, C. et autres Éditions Grand Duc- Groupe Éducalivres inc. <i>Science-tech au secondaire</i> Approuvé le 24 avril 2008 Note :Pour la 1re année du 2e cycle, les manuels de l'élève de cet ensemble didactique sont approuvés. Les guides d'enseignement afférents seront approuvés ultérieurement. Transcription en braille disponible :Commission scolaire des Premières-Seigneuries	Manuels de l'élève (2)	547
Synergie, 1re année du 2e cycle (ST) © 2008	Chartré, C., Levert, I. TC Média Livres inc. (Chenelière Éducation) <i>Synergie</i> Approuvé le 1 juin 2011 Transcription en braille disponible :Commission scolaire des Premières-Seigneuries	Guides d'enseignement (2) Manuel de l'élève	542

2e année du 2e cycle du secondaire

Titre	Description	Éléments approuvés	Pages
Écosphère, 2e année du 2e cycle (ST et STE) © 2009	Dubreuil, M. et autres Les Éditions CEC inc. <i>Écosphère</i> Approuvé le 18 janvier 2011	Guides d'enseignement (2) Manuels de l'élève (3)	810
Observatoire, 2e année du 2e cycle (ST, SE, ATS, STE) © 2008	Cyr, M.-D., Forget, D., Verreault, J.-S. Éditions du Renouveau pédagogique inc. <i>Observatoire</i> Approuvé le 5 janvier 2010 Transcription en braille disponible :Commission scolaire des Premières-Seigneuries	CD-ROM (2) Guides d'enseignement © 2009 (2) Manuel de l'élève	556
Science-tech au secondaire - Un regard sur l'environnement, 2e année du 2e cycle © 2009	Barbeau, C. et autres Éditions Grand Duc- Groupe Éducalivres inc. <i>Science-tech au secondaire</i> Approuvé le 11 octobre 2010 Note :Les manuels sont approuvés pour les programmes Science et technologie puis Science et technologie de l'environnement seulement. Les identifications Applications technologiques et scientifiques de même que Science et environnement seront retirées lors de la réimpression.	CD-ROM DVD vidéo Guides d'enseignement (2) Manuels de l'élève (3)	818
Synergie, 2e année du 2e cycle (ST-STE) © 2009	Couture, I. et autres TC Média Livres inc. (Chenelière Éducation) <i>Synergie</i> Approuvé le 27 janvier 2011 Transcription en braille disponible :Commission scolaire des Premières-Seigneuries	CD-ROM Guides d'enseignement © 2010 (3) Manuel de l'élève Manuel de référence - Outils	540 84

CHIMIE

3e année du 2e cycle du secondaire

Titre	Description	Éléments approuvés	Pages
Option science - Chimie, 3e année du 2e cycle © 2010	Cyr, M.-D. Éditions du Renouveau pédagogique inc. <i>Option science</i> Approuvé le 31 mai 2011	Guides d'enseignement (2) Manuel de l'élève	340
Quantum - Chimie, 3e année du 2e cycle © 2010	Couture, I. et autres TC Média Livres inc. (Chenelière Éducation) <i>Quantum</i> Approuvé le 16 décembre 2011	CD-ROM (2) Guides d'enseignement © 2011 (2) Manuel de l'élève	438

Annexe 6 : Le certificat d'approbation éthique



Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche

N° de certificat
CPER-15-060-D(1)

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE - 1er renouvellement -

Le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPER), selon les procédures en vigueur et en vertu des documents relatifs au suivi qui lui a été fournis conclut qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal

Projet	
Titre du projet	L'enseignement du modèle particulière.
Étudiante requérant	Frikia Cheikh [REDACTED] Candidate au doctorat, Didactique - Faculté des Sciences de l'éducation Université de Montréal
Sous la direction de	Marcel Thouin, professeur titulaire, Didactique - Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal
Financement	
Organisme	Non financé
Programme	--
Titre de l'octroi si différent	--
Numéro d'octroi	--
Chercheur principal	--
No de compte	--

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au CPER qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique. Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au CPER.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du CPER.

[REDACTED]
Olivier St-Laurent, Conseiller en éthique de la recherche
Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche
Université de Montréal

28 juin 2016
Date de délivrance du renouvellement ou de la réémission*

10 juin 2015
Date du certificat initial

*Le présent renouvellement est en continuité avec le précédent certificat

1er juillet 2017
Date du prochain suivi

1er juillet 2017
Date de fin de validité

adresse postale
3744 Jean-Brillant, B-430-8
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal QC H3C 3J7
www.cper.umontreal.ca

Téléphone : 514-343-6111 poste 1896
cper@umontreal.ca

Annexe 7 : Les activités d'utilisation du modèle particulaire dans les guides d'enseignement et dans les activités pédagogiques des maisons d'Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. et de Chenelière Éducation

1- Activité 4 page 33

Léa et Mathis ont chacun un verre de jus avec des glaçons. Léa brasse son jus avec une cuillère. Mathis le laisse reposer sur la table. Dans quel verre les glaçons fondront-ils le plus vite ? Explique ta réponse. (Cowan, Dumont, Fournier, & Trottier, Univers, L'essentiel, Cahier de savoirs et d'activités, 1re secondaire, 2013).

2- Activité 2 page 182

Quelle caractéristique du modèle particulaire permet le mieux d'expliquer chacun des énoncés suivants ?

- a) Plusieurs gaz sont invisibles.
- b) Beaucoup de solides sont rigides.
- c) Les liquides sont capables de se répandre.
- d) Pour conserver un gaz, il faut le placer dans un contenant fermé. (Cyr & Verrault, L'essentiel 3, Collection Observatoire, Cahier de savoirs et d'activités, Programme ST et ATS, 2014)

3- Activité 9 page 100

Étienne a allumé une bougie à l'aide d'une seule allumette. Pourtant, on sent le soufre brûlé de l'allumette dans toute la maison. Expliquez pourquoi. (Escrivà, Gagnon, & Richer, Conquêtes, Cahier d'apprentissage, Guide-corrigé, 1re secondaire, 2016).

4- Activité 8 page 258

L'élève représente l'état final d'une dilution au moyen du modèle particulaire (Escrivà, Gagnon, & Richer, ADN, Guide-corrigé, 3e secondaire, 2018).

5- Activité 9 page 258

L'élève représente une dissolution au moyen du modèle particulaire (Escrivà, Gagnon, & Richer, ADN, Guide-corrigé, 3e secondaire, 2018).

6- Activité 10 page 265

L'élève représente le produit d'une réaction de précipitation au moyen du modèle particulaire (Escrivà, Gagnon, & Richer, ADN, Guide-corrigé, 3e secondaire, 2018).

7- Des activités supplémentaires du guide de l'enseignement à la page AS-38

L'élève représente un mélange homogène, un élément et un composé (Escrivà, Gagnon, & Richer, ADN, Guide-corrigé, 3e secondaire, 2018).