

Table des matières

Introduction 1	
1 Problématique.....	3
1.1 L'enseignement des sciences.....	3
1.2 La chimie comme discipline scolaire.....	4
1.3 Domaines multiples du savoir en chimie.....	5
1.4 Les conceptions alternatives.....	11
1.4.1 Les conceptions alternatives : obstacles à l'apprentissage.....	11
1.4.2 Conceptions alternatives : leurs origines, leur résistance au changement.....	15
1.4.3 De nombreuses conceptions trouvées.....	19
1.4.4 Nécessité d'aller au-delà des inventaires de conceptions.....	20
1.4.5 Contexte éducatif postsecondaire québécois.....	21
1.4.6 Taxonomie basée sur le raisonnement.....	24
1.5 Question générale de la recherche.....	26
2 Cadre conceptuel.....	29
2.1 Savoirs, connaissances et difficultés d'apprentissage en chimie.....	29
2.2 Analyse didactique du contenu.....	31
2.2.1 Grandes idées en chimie choisies pour cette recherche.....	32
2.2.2 Les énoncés propositionnels à travers la transposition didactique.....	32
2.3 Conceptions alternatives.....	35
2.3.1 Conceptions sur la nature corpusculaire de la matière.....	35
2.3.2 Conceptions sur la liaison chimique.....	39
2.3.3 Conceptions sur la forme des molécules.....	42
2.3.4 Conceptions sur les phénomènes macroscopiques.....	44
2.4 L'apprentissage est le changement conceptuel.....	46
2.4.1 Tenir compte des conceptions dans l'enseignement.....	46
2.4.2 Changement conceptuel à travers le temps.....	49
2.5 Raisonnement : des idées tacites aux réponses manifestes.....	51
2.5.1 Obstacles à l'apprentissage : en sciences, en chimie.....	54
2.5.2 Quatre types de raisonnement en chimie.....	57
2.5.3 Autre façon de concevoir le raisonnement : les heuristiques.....	61

2.5.4	Lorsque c'est l'agencement des concepts qui fait défaut.....	71
2.6	Sommaire du cadre conceptuel	74
3	Questions de recherche	77
4	Cadre méthodologique	79
4.1	Repérer et comprendre les conceptions alternatives.....	79
4.1.1	Définir le contenu	82
4.1.2	S'enquérir des conceptions alternatives des étudiants	83
4.1.3	Développer le test pour les conceptions.....	85
4.1.4	Précaution pour le développement d'items à deux paliers.....	85
4.2	L'inférence des processus du raisonnement (<i>modèles mentaux</i> → <i>réponse</i>)	88
4.3	Rappel des objectifs de la recherche.....	91
4.4	Échantillon	91
4.4.1	Phase préliminaire : exploration des conceptions et choix de l'échantillon	92
4.4.2	Phase pilote : design de l'outil et modes de raisonnement	93
4.4.3	Phase principale : détermination des conceptions répandues	94
4.4.4	Note sur l'éthique de la recherche	96
4.5	Outils de collecte de données.....	96
4.5.1	Phase préliminaire : entrevues	96
4.5.2	Phase pilote : questionnaire à justifications ouvertes	97
4.5.3	Phase principale : le questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes »	100
4.6	Traitement et analyse des données.....	105
4.6.1	Phase préliminaire.....	105
4.6.2	Phase pilote	105
4.6.3	Phase principale	107
5	Résultats	111
5.1	Phase préliminaire.....	111
5.2	Phase pilote	113
5.2.1	Taux de succès au premier palier.....	113
5.2.2	Justifications au deuxième palier	115

5.2.3	Typologie des causes menant des modèles mentaux aux mauvaises réponses	124
5.2.4	Sommaire de la phase pilote de la recherche	145
5.3	Phase principale	145
5.3.1	Score pondéré pour chaque item.....	146
5.3.2	Difficultés conceptuelles relevées.....	158
5.3.3	Corrélations entre les difficultés conceptuelles	175
5.4	Difficultés conceptuelles changeant dans le temps... ou non.....	182
5.4.1	Difficultés conceptuelles résistantes au changement.....	182
5.4.2	Difficultés conceptuelles dont la fréquence diminue à travers les études	187
5.4.3	Difficultés conceptuelles dont la fréquence augmente à travers les études	190
5.4.4	Sommaire de la phase principale de la recherche	194
6	Discussion	197
6.1	La définition de la molécule : un problème criant	198
6.2	Les atomes ont les propriétés des substances, les éléments ont celles de leurs	
composés	203	
6.3	Trois items caractéristiques pour les étudiants ayant le plus de difficulté..	205
6.3.1	Polarité des molécules : la base pose encore problème	207
6.3.2	Évaporation de l'eau : ne donne pas de l'eau pour plusieurs étudiants ..	208
6.3.3	Où est la liaison hydrogène? Partout!	211
6.4	Habiletés de raisonnement : apprendre à expliquer	213
6.5	Une difficulté propre au programme.....	215
6.6	Retour sur les questions de recherche.....	215
7	Conclusion	223
7.1	Rappel de la recherche	223
7.2	Limites de la recherche	224
7.3	Quelques outils pour les enseignants	228
7.4	Pistes à explorer	232
	Bibliographie.....	235
	Annexe A : Notions de chimie.....	i

A.1	Analyse didactique du contenu	i
A.1.1	Mise en garde : le niveau de formulation de cette section.....	i
A.1.2	Le comportement et la structure de la matière	ii
A.1.3	Substances pures : quatre catégories du domaine macroscopique	iv
A.1.4	Quelques notions sur la liaison chimique.....	v
A.1.5	La polarité : principe explicatif important, mais équivoque.....	vii
A.1.6	Nature sous-microscopique pour expliquer les phénomènes macroscopiques.....	xiv
A.1.7	Nature corpusculaire, polarité et état de la matière : un résumé.....	xx
Annexe B	: Énoncés propositionnels	xxi
Annexe C	: Carte conceptuelle	xxiii
Annexe D	: Principales conceptions répertoriées dans les écrits scientifiques.....	xxv
Annexe E	: Questionnaire MPP et grille de pointage pour le score pondéré de chaque item xxvii	
Annexe F	: Difficultés conceptuelles trouvées par le MPP	xlix
Annexe G	: Certificats d'éthique	liii

Liste des tableaux

Tableau I : Heuristiques contraignant le raisonnement en chimie	64
Tableau II : Description de l'échantillon expérimental total pour chacune des phases de l'étude	92
Tableau III : Description de l'échantillon pour les entrevues cliniques de la phase préliminaire	92
Tableau IV : Description de l'échantillon pour la phase pilote	93
Tableau V : Échantillon d'étudiants ayant participé à la phase principale du projet, selon leur établissement d'enseignement	95
Tableau VI : Moyenne au premier palier du test à choix multiples et justifications ouvertes, selon la progression dans leurs études.....	114
Tableau VII : Réponses et justifications d'étudiants au sujet de la forme des molécules et cause de leur mauvaise réponse ou mauvaise justification.....	116
Tableau VIII : Réponses et justifications d'étudiants au sujet de la forme des molécules et cause de leur mauvaise réponse ou mauvaise justification.....	121
Tableau IX : Typologie des causes menant des modèles mentaux aux mauvaises réponses et de leurs catégories et définitions.....	126
Tableau X : Thèmes des questions ayant fait l'objet de la phase pilote de la recherche, et pourcentage de fois que chaque thème n'a pas été répondu par les étudiants à cette phase	141
Tableau XI : Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre le score pondéré à chaque item et la session	150
Tableau XII : Effectif étudiant de chaque sous-échantillon, défini selon les cours suivis et réussis au moment de répondre au MPP.....	151
Tableau XIII : Moyennes des scores pondérés par sous-échantillon et résultats des analyses de variance réalisées entre le score pondéré de chacun des sous-échantillons pour chaque item	153
Tableau XIV : Items pour lesquels le score pondéré est différent selon le genre.....	156
Tableau XV : Sous-ensembles homogènes de régions du Québec quant au score pondéré moyen au questionnaire MPP	157

Tableau XVI : Aperçu des conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles relevées par le test « Molécules, polarité et phénomènes »	159
Tableau XVII : Principales difficultés conceptuelles sur la notion de molécule	160
Tableau XVIII : Principales difficultés conceptuelles sur la forme des molécules	161
Tableau XIX : Principales difficultés conceptuelles sur la polarité.....	164
Tableau XX : Principales difficultés conceptuelles sur les liaisons chimiques	167
Tableau XXI : Principales difficultés conceptuelles sur l'état de la matière	169
Tableau XXII : Principales difficultés conceptuelles sur la solubilité et la mise en solution.	170
Tableau XXIII : Principales difficultés conceptuelles sur la nature corpusculaire de la matière	173
Tableau XXIV : Principales difficultés conceptuelles sur la structure sous-microscopique des solides	174
Tableau XXV : Coefficients de corrélation entre le score pondéré de chaque item et le score pondéré total.....	176
Tableau XXVI : Proportion d'intersection pour les difficultés conceptuelles relevées dans plus d'un item	181
Tableau XXVII : Conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants sont semblables, sans égard aux cours de chimie suivis et réussis au moment de répondre au MPP.....	184
Tableau XXVIII : Conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants diminuent au fur et à mesure qu'ils réussissent davantage de cours de chimie au cégep	188
Tableau XXIX : Conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants augmentent au fur et à mesure qu'ils réussissent davantage de cours de chimie au cégep.....	191
Tableau XXX : Résumé des items Q05, Q15 et Q17, les items d'ancrage pour les étudiants ayant le moins bien performé	206
Tableau XXXI : Catégories de substances pures	iv

Liste des figures

Figure 1 : Les deux niveaux de la transposition didactique.....	33
Figure 2 : Continuum de l'intensité relative des liaisons chimiques	40
Figure 3 : Les quatre schémas des <i>modèles mentaux</i> → <i>réponse</i> du processus menant des modèles mentaux (tacites) à la réponse à une question (manifeste).....	52
Figure 4 : Obstacles associés aux quatre schémas du processus <i>modèles mentaux</i> → <i>réponses</i>	56
Figure 5 : Exemple d'un item où chaque justification au deuxième palier correspond manifestement à une seule option du premier palier	86
Figure 6 : Exemple d'un item où le deuxième palier ne représente pas des justifications pour le choix au premier palier	87
Figure 7 : Exemple d'un item à deux paliers bien conçu.....	88
Figure 8 : Activités et objectifs des trois phases de la recherche.....	91
Figure 9 : Un item à deux paliers à justification ouverte développé dans le cadre de cette étude	99
Figure 10 : Saisie d'écran du premier palier d'un item à choix multiples du questionnaire MPP sur ConSOL	102
Figure 11 : Saisie d'écran du deuxième palier de l'item présenté à la figure 10, lorsque le choix au premier palier est b)	103
Figure 12 : Énoncé de la question et choix de réponse du premier palier pour l'item « Laquelle est une molécule, formule » (Q02)	109
Figure 13 : Deux items sur la géométrie moléculaire développés lors de la phase pilote de la recherche.....	115
Figure 14 : Deux items à deux paliers sur les liaisons intermoléculaires développés dans le cadre de cette étude.....	120
Figure 15 : Modèle tridimensionnel de la molécule de chlorure de thionyle (à gauche) et de l'ion ammonium (à droite).....	138
Figure 16 : Photographies des modèles planaires construits par les étudiants	138
Figure 17 : Choix de réponse à la question « laquelle est polaire, boules et bâtonnets », dans la version du questionnaire à justification ouverte. La bonne réponse est b).....	142

Figure 18 : Diagramme de Venn pour la simplification abusive « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides » (Q12 et Q18).....	177
Figure 19 : Diagramme de Venn pour la simplification abusive « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire » (Q09 et Q19).....	179
Figure 20 : Choix de réponse au premier palier de la question Q20.....	198
Figure 21 : Diagramme de Venn représentant la distribution des étudiants ayant incorrectement répondu aux items Q05, Q15 et Q17	207
Figure 22 : Nombre d'étudiants ayant montré un raisonnement se classant dans les quatre schémas <i>modèles mentaux</i> → <i>réponse</i> , en fonction du nombre d'items du MPP (Schéma A) ou du nombre de difficultés identifiées (pour chaque autre schéma)	220
Figure 23 : Représentation de la surface électrostatique de l'acétone, une molécule polaire .	viii
Figure 24 : Vecteurs de polarité des liaisons des molécules de sélénure d'hydrogène (H ₂ Se) et d'oxyde d'hydrogène (H ₂ O).	x
Figure 25 : Géométries moléculaires pour un nombre de domaines électroniques entre deux et quatre.....	xii
Figure 26 : Deux molécules polaires et deux molécules non polaires	xiii
Figure 27 : Schéma du raisonnement pour prédire l'état – solide, liquide ou gazeux – d'une substance aux conditions ambiantes.	xvii

À Bruno, maman, papa et Couie

Remerciements

Une telle recherche aurait été impossible sans la collaboration de nombreux enseignants de chimie, en particulier ceux qui enseignent ou qui ont enseigné au cégep André-Laurendeau durant les années où je l'ai menée : Suzanne, René, Bruno, Christian, Véronique, Julie, Josée et François. Merci beaucoup pour les discussions intéressantes et stimulantes qu'on a eues chaque fois que je sortais de nouveaux résultats, et pour votre apport considérable à la collecte et l'analyse de mes données. De façon moins proximale, mais tout aussi importante, une centaine d'enseignants de chimie des collèges et cégeps ayant participé à la recherche m'ont ouvert la porte de leurs classes pour que j'aie accès à sonder les conceptions alternatives de leurs étudiants; je les remercie de leur confiance et du temps qu'ils ont consacré à ma recherche.

Je remercie aussi les milliers d'étudiants qui ont effectivement participé à la recherche. Ce peut être déstabilisant d'être mis face à des questions qui bouleversent nos représentations; j'espère qu'ils ne m'en voudront pas trop et qu'ils seront réconfortés à l'idée qu'ils ont contribué à l'Avancement Des Connaissances Humaines!

Mon équipe de recherche à l'Université de Montréal a rendu possible un projet qui par moments me semblait trop vaste pour être mené à terme. Je remercie mes collègues étudiants de leur présence et de la camaraderie qu'on a partagée. J'envoie aussi un coup de chapeau bien spécial à Isabelle Harpin, informaticienne, qui a développé la plateforme ConSOL, avec compétence et grande disponibilité. Du même souffle, je remercie la professeure Marie-Noël Bêty, qui m'a souvent montré le chemin et m'a encouragée sans réserve.

Cette recherche n'aurait jamais été menée si je n'avais pas fait des études doctorales, et je n'aurais jamais fait d'études doctorales si cela n'avait été de ma rencontre avec le professeur Jesús Vázquez Abad, qui allait devenir mon directeur de thèse. Je le remercie d'avoir vu en moi une candidate potentielle à des études de troisième cycle. Il semble qu'il avait raison!

Je remercie aussi pour leur appui financier le Programme d'aide à la recherche sur l'enseignement et l'apprentissage du Gouvernement du Québec et la Chaire d'étude et de recherche en enseignement des sciences et technologies en milieu scolaire et collégial de l'Université de Montréal.

Un dernier mot pour Bruno : merci de m'avoir talonnée sans relâche, cette thèse et la recherche de laquelle elle provient sont bien meilleures parce que tu te mêles toujours de mes affaires. Continue.

Introduction

Parmi les sciences naturelles, la chimie occupe une place particulière dans l'imaginaire populaire. Avec une certaine dose de romantisme, le public croit souvent que le laboratoire de chimie met en scène de spectaculaires changements de couleurs et des explosions violentes sur une base quotidienne, et que les chimistes communiquent entre eux par des formules sibyllines au moyen de symboles cabalistiques. C'est ainsi que la chimie est considérée comme une science difficile, parce qu'elle semble inaccessible.

Les étudiants aussi perçoivent souvent la chimie comme une discipline difficile. Leur premier contact avec cette science passe généralement par les modèles sous-microscopiques de la matière : les atomes, les molécules. Non seulement ces entités sont-elles trop petites pour être perçues par les sens, mais en plus leur utilisation dans un raisonnement scientifique s'appuie abondamment sur des représentations symboliques complexes. En plus de nécessiter un niveau d'abstraction élevé, la chimie comporte tout un langage symbolique qu'il faut apprendre en même temps que les modèles qu'il représente. Même les étudiants collégiaux de Sciences de la nature, qui n'en sont pourtant pas à leurs premières armes en chimie, éprouvent parfois de la difficulté à mettre en relation les modèles de la chimie et les phénomènes (changements de couleur, explosions ou autres réactions moins sensationnelles) qu'ils expliquent.

L'apprentissage se passe dans le for intérieur des étudiants, tacitement, secrètement. Face à des notions, à des contenus, les étudiants doivent reconstruire dans leur esprit des concepts dans une forme et une nature qui leur appartiendra. En chimie, les concepts sont nombreux, peu intuitifs et souvent interreliés, ce qui peut ouvrir la porte à des reconstructions qui ne sont pas en accord avec la théorie scientifiquement acceptée par la communauté. De telles reconstructions inadéquates des concepts scientifiques sont appelées des conceptions alternatives. Ces conceptions alternatives constituent un enjeu important de la recherche didactique mondiale, parce qu'elles peuvent mettre en péril l'apprentissage des étudiants et parce qu'elles sont, par nature, difficilement perceptibles par les enseignants. En effet, ce sont des représentations personnelles, tacites, et qui ne s'expriment qu'à travers la résolution de tâches.

De nombreuses conceptions alternatives ont été répertoriées dans les écrits de recherche, certaines étant très répandues dans la population étudiante. Ces conceptions ne peuvent pas demeurer dans l'esprit des étudiants si on souhaite que leur apprentissage aboutisse à des connaissances conceptuelles en accord avec les théories scientifiquement acceptées.

Comme elles sont difficilement observables dans le cadre d'un enseignement traditionnel, les conceptions alternatives qu'on souhaiterait changer devraient être mises en lumière par des méthodes développées expressément pour ce faire. La recherche a proposé différentes méthodes pour l'analyse didactique des conceptions. La mise en place d'un protocole empirique pour la recherche de conceptions alternatives nécessite le recours à des outils spécialement développés pour cette fin, et idéalement à un échantillon important pour bien représenter la population à l'étude.

Pour répondre à ces préoccupations, la présente recherche a été menée et sera présentée dans cette thèse.

Dans les chapitres qui constituent cette thèse, on verra d'abord la pertinence de mener une recherche sur les conceptions des étudiants en chimie (chapitre 1). Ensuite, les recherches les plus pertinentes qui ont contribué à la didactique de la chimie seront recensées, ce qui permettra de faire l'inventaire des conceptions alternatives répertoriées et des types de raisonnement utilisés en chimie par les novices et par les experts (chapitre 2). Le chapitre 3 présentera les questions de recherche, et le chapitre 4, le cadre méthodologique qui a permis de répondre à ces questions. Ce chapitre indiquera de plus les caractéristiques de l'échantillon d'étudiants ayant participé à la recherche, les outils de collecte de données développés et utilisés, et le traitement des données recueillies et leur analyse.

Les résultats seront présentés dans le chapitre 5, séparé en sous-sections correspondant aux trois phases de la recherche. C'est dans ce chapitre que les conceptions des étudiants seront présentées, en plus des autres difficultés conceptuelles qui sont ressorties de l'analyse des données. Le chapitre 6 présentera quant à lui une discussion de ces résultats, de même que des recommandations pour l'enseignement de la chimie au niveau collégial.

1 Problématique

1.1 L'enseignement des sciences

La pertinence de l'enseignement des sciences n'est pas à remettre en question. De nombreuses raisons culturelles et sociales justifient l'importance accordée à l'éducation scientifique des jeunes. Notamment, une telle éducation sert à former une main-d'œuvre compétente en sciences et technologies, à donner une base de raisonnement aux futurs consommateurs et à développer leur sens critique, à outiller les citoyens pour qu'ils prennent des décisions collectives éclairées sur les politiques publiques touchant à la science, et à propager l'édifice culturel immense des connaissances scientifiques, l'une des plus grandes réalisations humaines (Duit & Treagust, 2003).

La chimie revêt une importance toute particulière dans la formation scientifique, étant donné les enjeux qui en relèvent dans les sociétés modernes, notamment ceux concernant les industries pétrochimique et biopharmaceutique. Au Québec en particulier, ces industries sont très présentes et meublent le discours des médias et des élus. Les enjeux qui y sont liés sont toutefois souvent trop complexes pour que la formation reçue dans les cours de niveau secondaire permette de bien les saisir. C'est pourquoi les cours de chimie au collégial sont importants pour former des jeunes qui comprendront les tenants et les aboutissants de ces défis modernes, même s'ils ne poursuivent pas, en fin de compte, une carrière scientifique.

Le programme québécois de Sciences de la nature, 200.B0, vise à préparer les jeunes aux études universitaires tout en leur fournissant « les composantes de base d'une formation scientifique et d'une formation générale rigoureuses » (MELS, 1998, p. 3). En formation spécifique, ces étudiants suivent des cours de chimie, de physique, de biologie et de mathématiques, les quatre disciplines maîtres d'œuvre du programme. Ces cours visent à développer des compétences, celles-ci représentant les composantes scientifiques rigoureuses visées par le Ministère, les établissements et les enseignants.

De nombreux étudiants suivent des cours de sciences au collégial. En effet, 11 % du total des étudiants inscrits au cégep, soit 22 458 personnes en 2007 (MELS, 2008b), étaient inscrits

en Sciences de la nature, un programme offert par tous les cégeps, dans toutes les régions du Québec.

La chimie est une discipline centrale aux sciences de la nature : elle fait naturellement le pont entre la physique et la biologie, se situant souvent à un niveau de zoom intermédiaire entre les deux. L'apprentissage de la chimie peut aider les étudiants de sciences à comprendre les autres disciplines scientifiques.

1.2 La chimie comme discipline scolaire

La chimie étudie la composition de la matière et les réactions ayant lieu entre les molécules qui la constituent. Elle traite donc autant des propriétés macroscopiques de la matière que des modèles microscopiques (visibles au microscope) – ou même sous-microscopiques (construits par déduction sur la base d'observations indirectes, car invisibles) – qui permettent d'expliquer et de prédire les phénomènes observés au niveau macroscopique. La chimie est une science expérimentale, constituée d'un ensemble de modèles et de théories qui ont été construits empiriquement, à partir d'observations expérimentales. Enfin, la chimie est à la fois science et industrie (Laszlo, 2012); elle ne se contente pas de décrire les transformations de la matière, mais organise, canalise et tire profit de ces transformations pour améliorer le bien-être collectif.

De façon classique, on considère que les trois principales visées de l'activité scientifique sont la *description* de phénomènes, leur *explication* par des théories et la *prédiction* de nouveaux phénomènes grâce aux modèles (Boutot, 2012; Thouin, 2009). Ainsi, l'apprentissage de la chimie au postsecondaire devrait mener les étudiants à comprendre les modèles pour les *décrire* et aussi à les intégrer suffisamment pour les utiliser pour *expliquer* et *prédire* le comportement de la matière. Un apprentissage réussi, dans ce contexte, mènerait les étudiants à raisonner de façon scientifique. L'enjeu de l'enseignement de la chimie est de faire apprendre de grandes idées aux étudiants, qui leur permettront de réaliser des prédictions justes du comportement de la matière (Schmidt, 1996).

Certains des concepts de chimie étudiés au collégial ont déjà été abordés au secondaire et sont revus plus en profondeur. Toutefois, plusieurs concepts, plus complexes que ceux qui sont abordés au secondaire, sont étudiés pour la première fois au cégep. Les deux cours de chimie obligatoires du programme de Sciences de la nature présentent les concepts principaux suivants : la nature corpusculaire de la matière, la stœchiométrie, les lois des gaz, les théories

de la liaison chimique, la cinétique chimique, l'équilibre et les théories des acides et des bases. Un ou deux cours optionnels peuvent être ensuite suivis par les étudiants, selon leur profil de sortie et les choix de leur établissement d'enseignement. Typiquement, ces cours optionnels permettent l'étude des concepts de la chimie organique (réactivité des composés organiques, synthèse organique, etc.).

Dans l'apprentissage de la chimie, le savoir est vaste et les connaissances, nombreuses. Les connaissances s'opérationnalisent sous plusieurs formes, comme les propriétés de la matière, sa réactivité, sa nature, mais aussi les modèles qui permettent d'expliquer et de prédire son comportement. Plusieurs de ces modèles reposent sur des constituantes trop petites pour être visibles; ce sont des modèles sous-microscopiques. Il faut donc une bonne dose d'abstraction pour parvenir à les intégrer.

Non seulement demande-t-on aux étudiants de chimie de « savoir que » la matière est constituée d'atomes, qui ont des propriétés, qui s'assemblent en structures plus complexes nommées molécules, aux propriétés différentes, mais on leur demande aussi de « savoir comment » dessiner les structures de ces molécules, calculer un rendement ou mesurer un pH. Pire encore, on leur demande de « savoir quand et pourquoi » tracer un mécanisme réactionnel pour prédire la stéréochimie de produits, ou encore utiliser certaines techniques d'analyse pour caractériser le produit d'une réaction. Ces trois exemples de connaissances, respectivement les connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles (Tardif, 1992), nécessitent toutes la mise en action de processus cognitifs distincts et pertinents.

On peut parfois croire que les connaissances déclaratives sont plus faciles à apprendre que les connaissances procédurales et conditionnelles. En chimie, toutefois, la distance épistémologique est si grande entre le monde qu'on peut observer et les modèles étudiés comme connaissances déclaratives, et les concepts constituant ces modèles sont si complexes et si peu familiers, que des obstacles peuvent surgir dès l'apprentissage des connaissances de base. Les connaissances procédurales et conditionnelles sont encore plus difficiles à maîtriser pour les étudiants.

1.3 Domaines multiples du savoir en chimie

Une caractéristique épistémologique de la chimie distingue cette dernière des autres sciences : la présence dans sa structure même de trois domaines du savoir, entre lesquels les

modèles explicatifs et prédictifs de cette science se séparent. Pour illustrer ce qui est entendu par « domaines du savoir », David Treagust, un éminent professeur de didactique des sciences, propose une analogie, suggérant même aux enseignants de chimie de commencer chaque cours avec cette anecdote. Un jour où il visitait le musée d'art du Los Angeles County, M. Treagust a vu la toile du peintre surréaliste belge René Magritte intitulée *La trahison des images*. Cette toile représente simplement une pipe sur un fond neutre, accompagnée de la légende : « Ceci n'est pas une pipe ». Bien qu'Australien, M. Treagust a compris la légende en français et s'est écrié « *This bloody looks like a pipe to me!* » (Gilbert & Treagust, 2009).

Bien entendu, Magritte voulait dire que son illustration d'une pipe n'est pas une pipe, mais bien la *représentation d'une pipe*. C'est cette prise de conscience qui a semblé pertinente à David Treagust pour l'enseignement de la chimie. En effet, les formules chimiques inscrites au tableau, les animations de particules entrant en collision, les mécanismes réactionnels ne sont pas ce qu'ils représentent. Ils forment un système de représentation impliquant un décalage entre le monde naturel et le modèle. Les représentations peuvent servir à illustrer le comportement de la nature corpusculaire de la matière, ou à l'opposé à symboliser une réaction chimique à l'échelle molaire. On peut traiter en chimie d'un problème en considérant des quantités manipulables en laboratoire de réactifs et de substrats, ou alors considérer spécialement un événement ponctuel d'une interaction entre deux particules de ce réactif et de ce substrat. Pour un chimiste, les domaines du savoir sont si imbriqués les uns dans les autres qu'ils ne se distinguent pas, l'un servant à expliquer l'autre, les manipulations du premier servant à prédire le comportement suivant. Les chercheurs en enseignement de la chimie ont par contre observé que les étudiants distinguaient mal les connaissances propres à chaque domaine, et que ce flou pouvait mener à des difficultés de compréhension.

Les chercheurs ont proposé qu'il existe trois domaines du savoir en chimie : les domaines symbolique (les équations, les symboles et les formules chimiques), sous-microscopique (la conceptualisation des molécules, des atomes) et macroscopique (les phénomènes observables, comme la couleur, la phase) (Gilbert & Treagust, 2009); ces trois domaines ont été proposés au départ par Johnstone (1982). Cette triple représentation est un enjeu si important en recherche dans le domaine de la didactique de la chimie qu'on lui a attribué un nom : la « relation du triplet » (*triplet relationship*) a ainsi servi de base à plusieurs auteurs pour analyser les difficultés d'apprentissage intrinsèques à la chimie (Gilbert & Treagust, 2009; Harrison & Treagust, 2002;

Nicoll, 2001; Talanquer, 2011; Treagust, Chittleborough, & Mamiala, 2003; Tsaparlis, 1997; Wu, 2003). Ce n'est en effet qu'après avoir maîtrisé ces trois domaines et leur interrelation qu'un étudiant pourra aspirer à utiliser correctement les modèles de la chimie pour prédire et expliquer les réactions de la matière.

Il est à noter que certains auteurs appellent ces domaines du savoir des « composantes de base » (Johnstone, 1993), des « niveaux [de représentation] » (Tsaparlis, 1997) ou des « représentations » (Gilbert & Treagust, 2009). L'appellation « domaines multiples du savoir » sera préférée pour la présente recherche, parce que, comme proposé par Towns et ses collaborateurs (Towns, Raker, Becker, Harle, & Stutcliffe, 2012), les domaines du savoir en chimie ne sont pas nécessairement organisés en couches ou strates (ce ne sont donc pas à strictement parler des *niveaux*), et ne sont pas nécessairement représentés figurativement, sur papier ou dans une simulation informatisée (ce ne sont donc pas toujours des *représentations*).

Cette idée de trois domaines du savoir, distincts, mais interreliés, est donc devenue paradigmatique en chimie et en sciences de l'éducation (Talanquer, 2011). Certaines critiques affirment par contre que le modèle, trop schématique, ne traduit pas tous les cas de figure possibles en chimie (Talanquer, 2011; Towns et coll., 2012).

Les principales réserves de Talanquer (2011) quant au modèle séparé en trois niveaux sont qu'il est simpliste et néglige des distinctions importantes. En particulier, le triplet classique passe directement de l'échelle sous-microscopique à l'échelle macroscopique, sans s'arrêter au niveau microscopique. Ce bond semble négliger un niveau médian important. Il est par contre vrai qu'en chimie, telle qu'enseignée au collégial, le niveau microscopique est rarement invoqué pour expliquer la nature et que peu de modèles de la chimie représentent la matière à cette échelle. Pourtant, certains concepts de chimie travaillent en effet avec le domaine microscopique, par exemple l'étude de la forme de certains cristaux qui sont observés au microscope optique. Selon Talanquer, il manquerait donc quelques niveaux pour passer du corpuscule à ce qui est visible à l'œil nu pour bien décrire tout l'espace conceptuel de la chimie. C'est nécessaire selon lui de détailler davantage le domaine jusqu'alors nommé sous-microscopique pour tenir compte des difficultés que peuvent avoir les étudiants à passer d'un niveau sous-microscopique à un autre niveau sous-microscopique, par exemple pour passer de l'échelle atomique à l'échelle des molécules, deux niveaux dont la taille des objets et leurs

propriétés sont différentes, mais qui sont agrégés, dans le modèle classique de la relation du triplet, dans une seule appellation, le domaine sous-microscopique.

Il invoque aussi une ambiguïté fréquente dans les écrits de recherche entre le domaine symbolique et le domaine sous-microscopique. Certains auteurs considèrent les représentations des molécules comme relevant du domaine sous-microscopique, toutes structures confondues, même si plusieurs des représentations externes des molécules en chimie, sinon toutes, utilisent une représentation symbolique et devraient donc plutôt relever du domaine symbolique (Gilbert & Treagust, 2009). Talanquer parle alors de la dualité symbolique/sous-microscopique des représentations des molécules, qui ne devraient pas selon lui être deux niveaux distincts, mais s'informer l'un l'autre. L'appellation « sous-microscopique » devrait décrire la taille des objets décrits, alors que l'appellation « symbolique » devrait plutôt décrire la façon dont les objets sont visualisés. Il y aurait ainsi plusieurs visualisations possibles d'objets de la même taille, comme les symboles chimiques et les formules, mais aussi les dessins de corpuscules, les animations, les simulations et même les graphiques ou les équations.

Talanquer (2011) propose plutôt une série de six échelons successifs pour les représentations externes en chimie. Ces six échelons sont, du petit au plus grand, les échelons sous-atomique, moléculaire, supramoléculaire, multicorpusculaire, mésoscopique et macroscopique. Le niveau microscopique comme tel est absent, mais peut être compris par le niveau qu'il nomme mésoscopique, soit le premier niveau qu'on peut voir (au microscope optique). De plus, son modèle s'articule en trois dimensions, dont les axes sont les modèles, les visualisations et les expériences. Ainsi, les six échelons peuvent s'exprimer selon ces trois dimensions. Il cartographie ainsi ce qu'il nomme l'espace du savoir en chimie (*Chemistry Knowledge Space*).

Si le modèle de Talanquer est celui qui est le plus détaillé et celui qui peut décrire le mieux l'ensemble de l'espace du savoir en chimie, sa complexité n'en fait pas un outil pratique pour la présente recherche. Les mises en garde de Talanquer, qui servent à éviter les glissements de sens entre les niveaux classiques du triplet, sont suffisantes et devraient être considérées, même sans utiliser le modèle tridimensionnel qui découle de leur identification.

De plus, ses distinctions entre différents domaines sous-microscopiques sont probablement moins utiles pour appréhender les difficultés des étudiants que la cassure nette entre le niveau sous-microscopique et le niveau macroscopique. Talanquer prétend que les

étudiants éprouvent de la difficulté à saisir les propriétés de l'échelon moléculaire qui émergent du niveau sous-atomique, comme la géométrie moléculaire, qui émerge de l'arrangement des particules sous-atomiques des atomes constituant la molécule, notamment leurs électrons. C'est peut-être le cas, mais cette difficulté est d'un ordre de magnitude beaucoup plus faible que l'obstacle épistémologique profond auquel se butent les étudiants qui essaient d'expliquer les propriétés macroscopiques de la matière à partir des propriétés de ses composantes sous-microscopiques (Taber, 2001a). En effet, selon Taber (2001a), les propriétés émergentes à une échelle sous-microscopique sont plus faciles à concevoir, parce que ce sont des objets sous-microscopiques (les atomes, les électrons) qui donnent leurs propriétés à d'autres particules sous-microscopiques (les molécules). Au contraire, le bond épistémologique entre des particules sous-microscopiques invisibles, intangibles (comme les molécules) et les propriétés de la matière qu'ils peuvent observer de leurs propres yeux (comme l'ébullition) est difficile pour les étudiants, parce que l'échelle de laquelle le principe explicatif doit être issu n'est pas la même que celle à laquelle l'explication s'adresse. Les étudiants utilisent les composantes du domaine sous-microscopique comme étant des outils logiques de même teneur; ce n'est pas le passage d'une échelle sous-microscopique à l'autre qui leur cause difficulté, mais simplement la procédure qui est nécessaire à appliquer pour agencer ces composantes entre elles.

D'autres auteurs ont proposé une autre bonification du triplet classique, en ajoutant un quatrième pôle, le pôle « microscopique » (Towns et coll., 2012). Ces auteurs proposent donc un modèle à quatre pôles, qu'ils nomment des domaines : les domaines symbolique, corpusculaire, microscopique et macroscopique. Il leur a paru nécessaire, tout comme à Talanquer, d'inclure le niveau microscopique en particulier étant donné leur objet de recherche qui est l'enseignement de la biochimie. En biochimie, en effet, de nombreuses structures sont visibles au microscope optique (les cellules, les organelles) et ce niveau est particulièrement important dans les représentations externes de cette discipline.

Il n'a toutefois pas paru nécessaire d'ajouter de domaine microscopique au triplet classique pour la présente recherche. Les trois niveaux tels que décrits par Johnstone (1982) seront utilisés dans la présente recherche, en portant une attention particulière aux mises en garde prodiguées par Talanquer (2011) pour leur utilisation.

Malgré ces critiques, il demeure que la recherche a démontré le très grand écart existant entre le monde dont on fait l'expérience dans la vie de tous les jours et le monde tel qu'il est

modélisé par la chimie. Les étudiants doivent faire la différence entre les expériences, les modèles et les représentations, tout en construisant les relations entre ces domaines à différentes échelles.

Les représentations externes, qu'elles soient sous forme de symboles, de formules moléculaires, d'équations chimiques ou de schéma réactionnel, demeurent des écueils épistémologiques pour les étudiants (Towns et coll., 2012). En effet, un arrangement de symboles et de traits est difficilement conciliable, dans l'esprit des étudiants, avec des objets sous-microscopiques ayant des propriétés et réagissant entre eux. Il est très problématique pour les étudiants de faire la distinction entre les molécules et les représentations de molécules, pour eux une molécule n'étant que ce petit dessin, cette formule (Bucat & Mocerino, 2009).

Taber (2001a), en particulier, souligne ces difficultés. Il indique que les experts, contrairement aux novices, font facilement la distinction entre ces domaines et ne ressentent pas le besoin de spécifier dans quel domaine du savoir ils se situent lorsqu'ils communiquent. C'est un problème lorsque l'expert est un enseignant et que le novice est l'étudiant. Le discours de l'un peut ne pas être compris par l'autre. Ces différents domaines du savoir existent aussi, divisés de façon un peu différente, dans le corpus de recherche en didactique de la biologie et de la physique, mais sont nettement moins utilisés (Treagust, en préparation; Treagust & Tsui, 2013).

On disait plus tôt que les trois activités de la chimie consistaient à décrire, à prédire et à expliquer le comportement de la matière. Les modèles de la chimie incarnent ces activités. Les modèles dans le domaine sous-microscopique permettent de faire des prédictions qui s'avèrent vraies dans le domaine macroscopique. On emploie ces mêmes modèles pour expliquer les phénomènes macroscopiques. On emploie le domaine symbolique de la chimie pour décrire les phénomènes macroscopiques, pour décrire les modèles sous-microscopiques. Ainsi, les trois activités de la chimie s'articulent dans trois domaines, ce qui peut entraîner de la confusion, des difficultés d'apprentissage et éventuellement des conceptions alternatives dans l'esprit des étudiants (Gilbert & Treagust, 2009). C'est de ces conceptions alternatives qu'il sera question immédiatement.

1.4 Les conceptions alternatives

1.4.1 Les conceptions alternatives : obstacles à l'apprentissage

Le plus grand obstacle que peuvent rencontrer les enseignants et les étudiants de sciences, et de chimie en particulier, est la présence de conceptions alternatives dans l'esprit de ces derniers (Garnett, Garnett, & Hackling, 1995), ce qui est étudié depuis plus de trente ans (Driver & Easley, 1978; Wandersee, Mintzes, & Novak, 1994). On entend par « conceptions » les représentations internes des étudiants à propos d'un concept, généralement en sciences (Treagust & Duit, 2008). Une conception est « alternative » quand elle constitue une connaissance propositionnelle ou conceptuelle différente de la définition scientifiquement acceptée d'un concept, ou incompatible avec celle-ci (Driver & Easley, 1978). Selon les auteurs, les conceptions sont aussi parfois nommées « conceptions naïves », *misconceptions*, « conceptions erronées », « représentations initiales », « croyances initiales », *pre-instructional conceptions*, etc. (Özmen, 2004). Pour parler de ces conceptions, la traduction littérale « conceptions alternatives » sera utilisée. Bien que cette appellation soit fautive en français, il n'existe aucune traduction satisfaisante pour signifier ce que les Anglo-saxons appellent *alternative conceptions*. Par souci de concision, à partir d'ici seront utilisés de façon interchangeable les termes « conceptions » et « conceptions alternatives ».

Comme les concepts de chimie sont souvent contre-intuitifs et évoqués par des termes ayant un sens différent dans la vie de tous les jours, et que les relations entre eux sont parfois confuses, il est difficile pour les étudiants de mettre de l'ordre dans leur apprentissage pour avoir un portrait clair et sans ambiguïté de la matière à l'étude (Zoller, 1990). De nombreuses conceptions ont été répertoriées dans les écrits scientifiques (Garnett et coll., 1995; Kind, 2004; Mulford & Robinson, 2002). Plusieurs d'entre elles peuvent être attribuables en partie à cet enchevêtrement de concepts. Le raisonnement correct est d'autant plus difficile à réaliser par les étudiants qu'ils n'ont pas de schéma clair de l'interrelation des concepts qu'ils doivent invoquer, ce qui rend ces derniers d'autant plus difficiles à saisir (Zoller, 1990).

Selon Driver et Easley (1978), les conceptions erronées (*misconceptions*) sont les idées qu'ont les élèves, que ceux-ci utilisent dans un ensemble de situations et qui ont les caractéristiques de théories ou de modèles élémentaires. Cette appellation a une connotation

évidente d'idée incorrecte, d'erreur. Toujours selon Driver et Easley (1978), elle est souvent employée pour parler d'idées que les élèves ont construites en réponse à un enseignement formel¹. On peut les assimiler à une incompréhension (*misunderstanding*).

Les cadres conceptuels alternatifs sont quant à eux des systèmes construits par les élèves, de façon autonome, pour s'expliquer leur propre expérience du monde physique. Pour les étudiants plus vieux, qui étudient des concepts plus avancés n'étant pas perceptibles par l'expérience physique du monde (en particulier, tout ce qui relève des modèles sous-microscopiques de la matière), le cadre conceptuel alternatif peut trouver ses origines dans des concepts appris en classe, mais à propos desquels les étudiants ont tiré des conclusions ou élaboré des explications qui ne sont pas en accord avec la théorie scientifique. Ces conclusions et ces ébauches d'explications témoignent de l'effort que les étudiants mettent à assimiler un contenu qui peut leur sembler incompatible avec leurs connaissances antérieures. Ils cherchent des similitudes entre des concepts et « remplissent les trous » que l'enseignement laisse derrière lui.

Plusieurs auteurs qui écrivent en anglais préfèrent utiliser le terme *alternative conception* plutôt que *misconception* à cause de son utilisation de plus en plus répandue et du fait qu'il n'a pas de connotation à charge émotionnelle négative (Wandersee et coll., 1994). En plus, les représentations des étudiants ne sont pas toujours à proprement parler erronées. En effet, parfois les étudiants se représentent incorrectement une partie du modèle, ou appliquent dans de mauvaises circonstances une partie de la théorie, sans qu'on doive pour autant les taxer d'avoir des représentations erronées, puisque ces représentations peuvent être valides dans certains contextes. Par exemple, une conception alternative répandue est que les atomes sont des particules indivisibles. Cette conception, relevant directement d'une ancienne théorie (le modèle atomique de John Dalton), est tout à fait valide et utilisable comme telle lorsque vient le temps de calculer une masse moléculaire : chaque atome est en effet considéré comme une entité indivisible, même si l'entité moléculaire est chargée (ayant perdu ou gagné des électrons). Il faut simplement éviter d'utiliser cette représentation dans des contextes où elle n'est pas valide (et ils sont nombreux, celui de la chimie quantique en étant un parmi d'autres). Cet exemple

¹ D'autres causes peuvent être à l'origine des conceptions alternatives, par exemple l'expérience avec le monde naturel. Il en sera question plus loin (à la section 1.4.2).

illustre que l'apparence d'une conception alternative chez un étudiant relève parfois de l'utilisation d'une théorie ou d'un concept, par ailleurs correct, dans un contexte où il ne s'applique pas.

D'autre part, parler de conceptions erronées porte la signification qu'il existe une vérité fondamentale aux observations et aux modèles scientifiques qui seraient « vrais », ce qui correspond à une position épistémologique idéaliste de la science et qui ne convient pas au cadre dans lequel la présente recherche s'inscrit, qui se réclame plutôt d'un cadre constructiviste de la science et de l'enseignement-apprentissage (Fourez, 1996).

Pour en revenir au cadre conceptuel alternatif des apprentissages scientifiques, il est difficilement reconnu dans le cours normal de l'enseignement, car un apprentissage peut sembler réussi parce que l'étudiant parvient, au terme de la leçon, à répondre à une évaluation de ses connaissances, tout en conservant une idée incohérente avec le modèle accepté qu'on a tenté de lui enseigner. Ausubel souligne pourtant l'importance de connaître les connaissances antérieures des élèves : « le facteur influençant de la façon la plus déterminante l'apprentissage est ce que l'apprenant connaît. Assurez-vous de savoir ce qu'il connaît et enseignez en conséquence » (Ausubel, Novak, & Hanesian, 1978, p. iv, traduction libre).

Les conceptions alternatives peuvent aussi constituer un cadre de référence qui semble valide aux étudiants, car ces derniers les arrangeant en un tout satisfaisant parce que cohérent pour eux. Elles sont d'autant plus difficiles à reconnaître parce qu'elles sont organisées en un « système explicatif, personnel et fonctionnel, qui n'est pas nécessairement exprimé au cours des activités scolaires » (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, & Toussaint, 2008, p. 147). Pour les repérer, le chercheur doit donc déployer des techniques particulières.

Les connaissances antérieures, dans lesquelles on peut trouver des conceptions alternatives, sont le résultat d'un apprentissage préalable, réalisé avant le moment considéré. Le paradigme constructiviste de l'apprentissage suppose que « les connaissances antérieures constituent la base à laquelle recourent les étudiants dans le processus de construction de nouvelles connaissances » (Tardif, 1997, p. 17). Dans une situation idéale, les étudiants peuvent s'appuyer sur cette base pour réaliser des tâches scolaires. C'est aussi sur cette base que les enseignants peuvent compter pour ajuster leurs leçons, et les décideurs du curriculum scolaire, pour déterminer les contenus à l'étude pour la population étudiante à un niveau donné. L'acte

même d'enseigner repose sur les connaissances antérieures, et ce, à tous les degrés d'enseignement.

Lorsqu'elles sont présentes dans les connaissances antérieures des étudiants, les conceptions alternatives peuvent mener à des erreurs dans les réponses à des questions traditionnelles en sciences, mais aussi parfois à des explications incorrectes pour des réponses par ailleurs correctes. C'est pourquoi la présence de conceptions peut être difficile à reconnaître (Osborne & Cosgrove, 1983), parce que le comportement manifeste (la réponse à la question) n'est pas nécessairement représentatif de la réalité cognitive latente (la représentation de l'étudiant).

C'est dans ces circonstances que la présence de telles conceptions alternatives pose problème pour l'apprentissage : lorsque l'étudiant se verra enseigner une nouvelle notion entrant en conflit avec son cadre conceptuel alternatif, la nouvelle notion risque d'être soit mal interprétée en raison de ses connaissances antérieures déviantes, soit carrément évitée parce que trop contradictoire par rapport à ce qu'il « sait » déjà. L'apprentissage, dans un cas comme dans l'autre, sera en péril. Dans cette perspective, les conceptions alternatives peuvent avoir un impact négatif sur l'apprentissage puisque les connaissances antérieures sur lesquelles celui-ci s'appuie sont teintées d'idées qui ne sont pas en accord avec la théorie scientifique (Ausubel, 1968; Driver & Easley, 1978).

Selon Posner, Strike et leurs collaborateurs (Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982), les étudiants arrivent en classe avec des conceptions alternatives déjà présentes au sein de leurs structures cognitives, et l'enseignement doit viser la résolution de ces conceptions pour permettre un apprentissage réussi. À ce titre, l'apprentissage passe par le changement conceptuel, un concept central en didactique des sciences dont il sera à nouveau question plus loin, dans le chapitre 2 « Cadre conceptuel ».

Les étudiants peuvent toutefois avoir d'autres difficultés que les conceptions alternatives avec l'apprentissage de la chimie. Notamment, de telles difficultés surviennent s'il y a de la confusion dans leurs connaissances antérieures, qui même si elles sont exactes, peuvent ne pas être organisées de façon à être invoquées à bon escient pour résoudre une tâche. Ou encore, les étudiants peuvent donner de mauvaises réponses ou de mauvaises explications quant à un phénomène si leurs connaissances sont lacunaires ou même parcellaires. Chez certains auteurs, ce manque d'organisation ou ces lacunes dans les connaissances sont assimilés à des

conceptions alternatives (par exemple, Nicoll, 2001). Chez Strike et Posner (1992) ou Driver et Easley (1978), par contre, les conceptions sont les représentations des étudiants qui sont centrales dans l'organisation de la pensée et de l'apprentissage. Les inventaires de conceptions alternatives fournis par les écrits de recherche témoignent de ce désaccord entre les différents auteurs sur la nature même des conceptions et de ce qui n'en est pas.

Peu importe leur étiquette, l'enseignant doit détecter tous ces problèmes dans l'apprentissage de ses étudiants et en tenir compte dans l'enseignement. Il est possible que les stratégies de changement conceptuel efficaces soient variées selon la nature des problèmes qu'on peut identifier. Il demeure que la première étape est de bien connaître les conceptions alternatives et les autres difficultés des étudiants, pour viser à améliorer l'enseignement.

C'est cet apparent paradoxe qui a déclenché une partie du questionnement à l'origine de la recherche présentée ici : les étudiants semblent réussir les problèmes liés à la structure sous-microscopique de la matière, mais les explications qu'ils donnent de celle-ci font soupçonner la présence de conceptions. Ils peuvent souvent répondre aux questions d'examen, qui leur demandent de répéter directement ce qu'on leur a enseigné. Mais comprennent-ils réellement, profondément, comment les modèles sous-microscopiques sont construits pour représenter les explications du monde macroscopique? Comme le précise Astolfi, justement pour nuancer le concept des connaissances antérieures : « Les apprentissages scientifiques ne résultent pas d'une simple juxtaposition à des connaissances antérieures; le progrès intellectuel résulte plutôt de la réorganisation d'un ensemble, souvent complexe, qui s'y opère » (Astolfi et coll., 2008, p. 155). D'un autre côté, lorsque les étudiants répondent mal à une question conceptuelle en chimie, est-ce nécessairement parce qu'ils ont une conception alternative sur ce sujet, ou peut-il justement y avoir un autre problème? Quels sont ces autres problèmes, et méritent-ils d'être étudiés?

1.4.2 Conceptions alternatives : leurs origines, leur résistance au changement

Dans un chapitre devenu aujourd'hui assez célèbre, Wandersee, Mintzes et Novak (1994) dressent la liste de huit « affirmations » (« *claims* ») à propos des conceptions alternatives, qu'ils font ressortir d'une importante rétrospective des écrits de recherche en didactique des sciences. Parmi ces huit affirmations, on trouve entre autres que les étudiants arrivent en classe avec des conceptions en désaccord avec la théorie scientifique acceptée

(*claim 1*), que les conceptions alternatives transcendent les cultures, les genres et même l'âge (*claim 2*), qu'elles sont tenaces et résistantes au changement par les moyens traditionnels d'enseignement (*claim 3*) et qu'elles prennent leur origine de diverses sources (*claim 5*). Ces deux dernières affirmations, sur les origines des conceptions et leur résistance au changement, méritent qu'on s'y attarde un peu, dans le contexte de la présente recherche.

Parmi les causes des conceptions alternatives, Wandersee et ses collaborateurs listent l'interaction avec le monde, les expériences personnelles, les pairs, les enseignants et les manuels. D'autres auteurs en arrivent aux mêmes propositions.

Levy Nahum et ses collaborateurs (Levy Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein, & Taber, 2010) ont déterminé que l'approche dite traditionnelle de l'enseignement d'un concept central en chimie, la liaison chimique, était la cause principale des conceptions alternatives des étudiants sur cette notion. Selon eux, les simplifications à outrance du contenu, notamment autour de la dichotomie « liaison ionique/covalente », de la polarité des liaisons ou de la « règle » de l'octet, donnent des définitions trop tranchées et imposent des distinctions trop rigides à des concepts en réalité nuancés et subtils, tout en ne fournissant qu'une base insuffisante aux étudiants pour rationaliser la liaison chimique. D'autres auteurs invoquent aussi la possibilité que ce soient l'enseignement ou les manuels qui, les premiers, sont la source de la construction de conceptions alternatives en chimie dans l'esprit des étudiants (Albanese & Vicentini, 1997; Bodner, 1991; Taber & Coll, 2002).

Taber (2001a) poursuit en faisant la distinction entre la chimie et les autres domaines scientifiques quant à l'origine des conceptions alternatives. Alors qu'en physique ou en biologie, il est facile de comprendre que les étudiants puissent arriver en classe avec des conceptions naïves dues à leur observation du monde (par exemple, sur le mouvement des corps ou la « nutrition » des végétaux) (Wandersee et coll., 1994), en chimie, les apprenants ne sont pas en contact direct avec les notions qui seront à l'étude. Ils n'ont pas l'occasion d'avoir une intuition sur des notions comme les molécules ou les réactions d'oxydoréduction; ils arrivent en fait en classe avec moins de préconceptions que dans les autres sciences. Toutefois, cela ne simplifie pas le problème pour autant : si les conceptions sont développées par la façon qu'un apprenant donne du sens à ce qui lui est présenté en classe relativement à ses connaissances antérieures, souvent les connaissances antérieures en chimie viennent exclusivement de l'enseignement précédent, qui a pu générer une compréhension qui n'est pas en accord avec les théories

scientifiques. De nombreux auteurs partagent ce point de vue sur l'origine des conceptions alternatives en chimie (Albanese & Vicentini, 1997; Bodner, 1991; Coll & Treagust, 2001; Taber & Coll, 2002). Suivant ces auteurs, il semble que le principal obstacle à l'apprentissage en chimie est l'obstacle didactique de Bachelard (*pedagogic* selon Taber).

Hartley et ses collaborateurs (Hartley, Wilke, Schramm, D'Avanzo, & Anderson, 2011) recommandent d'ailleurs aux enseignants de chimie de porter une attention particulière au vocabulaire qu'ils utilisent en classe, afin d'éviter la confusion possible avec le langage courant. Özmen (2004) indique, de plus, que la méconnaissance des enseignants de chimie des conceptions alternatives de leurs étudiants, comme de tout autre obstacle, peut avoir un impact négatif sur l'apprentissage.

Une autre source importante des conceptions alternatives semble trouver son origine dans la façon même de raisonner des étudiants (Talanquer, 2006, 2008). En effet, un raisonnement de sens commun, qui ne causerait aucun mal dans la vie quotidienne, peut mener à des réponses incorrectes en sciences. L'application d'un raisonnement de sens commun peut alors lui aussi être source de conceptions alternatives. Le cadre développé par Talanquer (2006) à ce propos en chimie, qu'il a nommé le *commonsense chemistry* (chimie de sens commun), vise à aider les enseignants de chimie à comprendre les conceptions alternatives de leurs étudiants en leur fournissant un cadre interprétatif des raisons ou des causes qui les expliquent et pourraient même permettre de les prédire. Selon ce cadre, des conceptions alternatives peuvent surgir si les étudiants font des suppositions empiriques, par exemple que les molécules réagissent pour atteindre un certain but (téléologie), ou s'ils emploient des heuristiques pour raccourcir leur raisonnement, par exemple que la taille des atomes augmente au même rythme que le nombre de particules qui les composent (réduction). De telles conceptions alternatives ne sont pas causées par l'enseignement formel, mais plutôt par la reconstruction du raisonnement dans la tête des étudiants, à l'issue d'un enseignement formel.

En ce qui concerne la résistance au changement des conceptions alternatives (*claim 3* de Wandersee et coll., 1994), elle est, elle aussi, largement reconnue dans les écrits de recherche (Çalik, Ayas, & Coll, 2010; Fetherstonhaugh & Treagust, 1992; Hewson & Hewson, 1984). Astolfi et ses collaborateurs (2008) sont aussi de cet avis : « Tous les auteurs mettent l'accent

sur le fait que les représentations² résistent aux efforts d'enseignement et perdurent souvent à travers toute la scolarité » (p. 148). Çalik, Ayas et Coll (2010) en ont fait l'observation en chimie, avec des élèves qui conservaient leur conception alternative sur la quantité de soluté qui, selon eux, augmentait lorsqu'une solution était chauffée, ce qui est contraire à ce qui leur avait pourtant été enseigné. Ils en concluent que cette conception est probablement bien structurée dans leur esprit et fondamentale (« *hard-core* »).

Toutefois, une de leurs phrases laisse planer un doute sur cette prétendue solidité : « However, some of the students were still confused as to whether or not an increase in temperature increases the amount of the dissolved solute » (p. 44). Si les étudiants sont incertains, leur croyance en cette conception alternative est peut-être moins résistante qu'il paraît. Dans le même sens, une recherche menée au Québec avec des élèves du secondaire (Potvin & Thouin, 2003) montre même une certaine fragilité dans les conceptions, que les étudiants abandonnent assez volontiers en cours de résolution de problème, s'ils sont placés dans un contexte le favorisant. Il existe manifestement un désaccord dans la recherche autour de la résistance des conceptions alternatives, qui est pourtant souvent présentée comme un dogme immuable en didactique des sciences. Cet apparent désaccord parmi les auteurs en didactique des sciences mériterait alors de s'y attarder, pour confirmer ou infirmer la résistance des conceptions alternatives au changement.

D'un autre côté, les étudiants qui sont placés devant un conflit cognitif, c'est-à-dire lorsqu'on leur enseigne un contenu qui n'est pas en accord avec leurs propres croyances (notamment, parce qu'ils ont des conceptions alternatives dans leurs connaissances antérieures), ces étudiants peuvent vivre ce que Leon Festinger a nommé la dissonance cognitive (Festinger, 1962). Cette dissonance amène les gens qui la ressentent à trouver une façon de regagner leur équilibre cognitif, mais d'une façon qui ne favorise pas l'apprentissage :

The existence of dissonance, being psychologically uncomfortable, will motivate the person to try to reduce the dissonance and achieve consonance. When dissonance is present, in addition to trying to reduce it, the person will

² Astolfi et coll. (2008) utilisent l'expression « représentations » comme un synonyme de « conceptions » (voir, par exemple, à la page 147).

actively avoid situations and information which would likely increase the dissonance (p. 3).

Ainsi, l'inconfort peut être tel qu'il mène les étudiants à éviter la nouvelle information qui fait dissonance, ou alors à la considérer comme sans importance. Dans un cas comme dans l'autre, le changement conceptuel est impossible. En effet, Posner, Strike et leurs collaborateurs (Posner et coll., 1982), s'ils indiquent que le conflit cognitif est l'une des conditions pour le changement conceptuel, ils précisent aussi que le nouveau concept présenté aux étudiants en situation de conflit cognitif devrait leur paraître fructueux pour résoudre le conflit, de façon à éviter justement de les placer dans une situation de dissonance cognitive et de fait, en porte-à-faux avec le nouveau concept.

Ainsi, on peut peut-être trouver une source de la résistance au changement conceptuel largement reconnue dans la dissonance cognitive, qui mène les étudiants à développer des mécanismes de défense pour préserver leur intégrité cognitive et les mène à rejeter les nouveaux concepts, en conservant leurs conceptions alternatives.

1.4.3 De nombreuses conceptions trouvées

La recherche a relevé de très nombreuses conceptions, sur à peu près tous les concepts enseignés en chimie, aux niveaux secondaire et postsecondaire (voir, par exemple, la bibliographie de Pfundt et Duit, 2009).

Özmen (2004) présente une intéressante revue des recherches, surtout qualitatives, portant sur les conceptions alternatives d'étudiants à propos de la liaison chimique. La liaison chimique y est présentée et étudiée comme un concept à part entière, mais Özmen s'attarde aussi à faire le lien entre cette notion et les concepts en amont (par exemple, la nature corpusculaire de la matière ou la structure atomique) et en aval (par exemple, la géométrie moléculaire) qui peuvent être reliés à la liaison chimique. La vaste quantité de conceptions déterminées par la recherche et rapportées par Özmen, ainsi que leur variété, milite en faveur de la mise en place de moyens didactiques adaptés à la présence de ces conceptions, qui doivent être considérées comme un obstacle important à l'apprentissage.

Taber (2001a) a quant à lui réalisé une revue des recherches visant à déterminer les difficultés des étudiants à comprendre et utiliser les différents modèles traitant de la structure

de la matière en chimie (les modèles de la structure des atomes, des molécules, des réseaux, etc.). Au contraire d'Özmen, il ne se limite pas aux études visant à déterminer les conceptions alternatives, mais il répertorie aussi les études se penchant sur les difficultés d'apprentissage en général.

Peu de recherches ont tenté de montrer l'impact de conceptions alternatives sur la compréhension d'un autre concept en chimie. Quelques-unes ont bien cherché à montrer la relation entre les conceptions sur la nature corpusculaire de la matière et la compréhension de la liaison chimique (Othman, Treagust, & Chandrasegaran, 2008), entre les conceptions sur l'énergie des liaisons et celles sur la liaison chimique (Boo, 1998) ou sur les explications qui peuvent être construites autour des propriétés colligatives des solutions (Talanquer, 2010), mais peu d'entre elles n'ont mis l'accent sur le lien entre la compréhension des phénomènes macroscopiques et celle des concepts sous-microscopiques qui les expliquent comme la nature corpusculaire, la nature des molécules, la polarité et les liaisons intermoléculaires. Étant donné que ces concepts sous-jacents servent à expliquer des phénomènes comme le changement de phase ou la solubilité, les conceptions alternatives à leur sujet pourraient avoir un impact négatif sur l'apprentissage de notions plus avancées.

1.4.4 Nécessité d'aller au-delà des inventaires de conceptions

Reinders Duit invitait récemment les chercheurs en didactique des sciences à investir leurs efforts dans un programme de recherche qui irait au-delà de l'inventaire simple des conceptions alternatives, entrepris dans les années 1970, pour tenter de rendre ces « catalogues » plus facilement utilisables par les autres chercheurs (Duit, 2011). En effet, bien que plusieurs causes de l'apparition de conceptions alternatives aient été déterminées (Wandersee et coll., 1994) – comme l'expérience quotidienne avec les phénomènes scientifiques, l'enseignement, le langage –, la recherche se concentre souvent sur la reconnaissance de celles-ci en négligeant de proposer des moyens d'en prendre compte dans l'enseignement.

Les enseignants de sciences, de leur côté, souhaitent discuter des conceptions des étudiants décrites par la recherche, mais ils ont de la difficulté à créer des situations pédagogiques autour des inventaires de conceptions ou même à s'en faire un portrait global, étant donné que ceux-ci sont très volumineux et qu'ils ne présentent généralement pas un

schéma régulier ou facilement reconnaissable (Talanquer, 2006). Ainsi, il est pertinent de développer un cadre explicatif pour la prise en compte des conceptions alternatives.

D'un autre côté, malgré l'important inventaire de conceptions existant déjà dans les écrits de recherche, très peu concernent spécifiquement les étudiants du collégial dans le contexte québécois. En ce qui a trait à la chimie, il n'y a simplement aucune recherche qui a jamais été menée pour établir un tel portrait des connaissances conceptuelles des étudiants québécois. Les conclusions des études américaines, britanniques, australiennes et turques sur les conceptions alternatives en chimie des étudiants d'âge collégial présentent peut-être des conclusions transférables au Québec, mais il est impossible d'en être certain, les différences entre les programmes et les systèmes d'enseignement menant peut-être à une variabilité entre les conceptions alternatives. La sous-section suivante présentera une brève mise en contexte de la présente recherche, menée dans le milieu collégial québécois.

1.4.5 Contexte éducatif postsecondaire québécois

Le système éducatif québécois est différent du reste de l'Amérique du Nord pour les études postsecondaires. En effet, au Québec, les étudiants qui souhaitent entreprendre des études universitaires doivent d'abord compléter un programme préuniversitaire, offert par une soixantaine de cégeps et collèges postsecondaires privés répartis sur l'ensemble du territoire québécois. Cet ordre de l'enseignement a une certaine parenté avec les *community colleges* américains, en ce sens où ils sont typiquement installés dans les lieux où les étudiants habitent déjà, et leur offre la possibilité de poursuivre leurs études souvent sans avoir à quitter le domicile familial. Toutefois, les étudiants de cégep sont différents des étudiants des *community colleges* en ce sens qu'ils forment l'entièreté de la communauté étudiante entre le secondaire et l'université : effectivement, le cégep est un préalable obligatoire pour accéder à des études menant à un diplôme universitaire.

Les cégeps ont été fondés à la suite d'une commission d'enquête sur l'enseignement au Québec, dans les années 1960. Cette commission, la Commission Parent, a tracé un portrait sombre du système éducatif québécois de l'époque, notamment en ce qui avait trait aux francophones de la province, pourtant largement majoritaires (Corriveau, 1991). En effet, les francophones de la classe moyenne avaient alors très peu l'opportunité de poursuivre des études supérieures, qui étaient réservées aux anglophones et aux gens avec des moyens financiers plus

importants. Dans la foulée des réformes politiques et sociales qui ont profondément bouleversé le paysage québécois dans les années 1960, et auxquelles on réfère maintenant comme étant la période de la Révolution tranquille, l'accès à l'éducation postsecondaire pour tous est soudainement devenu possible sur les bases de la Réforme Parent. Cette réforme avait trois visées : « valoriser un enseignement public qui était alors de qualité bien inférieure à l'enseignement privé; unifier le système d'enseignement, qui était beaucoup trop fragmenté et atomisé; rendre polyvalent un système d'enseignement qui était trop rigide et trop compartimenté » (Rocher, G. (1988) dans Corriveau, 1991, p. 10).

Le cégep est encore un ordre d'enseignement entièrement financé par l'État, où les études sont gratuites pour les étudiants. Cet avantage permet à de nombreux étudiants québécois d'accéder aux études supérieures, ce qui s'est traduit par une augmentation prodigieuse de la fréquentation universitaire à la suite de l'ouverture des cégeps, à la fin des années 1960 et au début des années 1970 (Corriveau, 1991). Cette démocratisation de l'accès aux études supérieures a été importante au Québec pour l'amélioration de la mobilité sociale des francophones.

Le programme préuniversitaire de sciences de la nature, présent dans tous les cégeps de la province, est offert aux étudiants qui se destinent aux études supérieures universitaires dans de nombreux domaines scientifiques – génie, médecine, sciences pures, etc. –, mais aussi aux étudiants qui n'ont pas encore fixé leur choix de carrière. En effet, plusieurs programmes universitaires exigent que les candidats qui s'y inscrivent aient suivi le programme de sciences de la nature collégial. À l'opposé, peu de programmes universitaires exigent des préalables collégiaux d'autres programmes. C'est pourquoi faire son cégep en sciences de la nature est la façon traditionnelle pour les étudiants qui n'ont pas choisi leur carrière de garder toutes les portes ouvertes pour l'université.

Pour être admis dans le programme de sciences de la nature de n'importe quel cégep, les étudiants doivent détenir un diplôme d'études secondaires, en plus d'avoir réussi, en cinquième secondaire (la dernière année de cet ordre d'enseignement, équivalant au *Grade 11*), les mathématiques pour sciences, le cours de chimie et le cours de physique (MELS, 1998).

Ainsi, les étudiants du programme de sciences de la nature collégial n'en sont pas à leurs premières armes en sciences. Mais comme la démocratisation de l'enseignement postsecondaire qui s'inscrit dans la suite du Rapport Parent amène depuis un fort volume d'étudiants dans ce

programme d'études, qui ne sont pas tous à priori intéressés par une carrière scientifique, le défi est grand pour les enseignants de cégep. D'une part, les étudiants sont nombreux et ils ne s'intéressent pas tous aux sciences comme choix définitif de carrière future, mais d'autre part, les contenus à couvrir durant les deux années de ce programme préuniversitaire relèvent d'un niveau de formulation didactique qui dépasse ce qui est enseigné au secondaire. On enseigne des contenus typiquement universitaires à des étudiants qui ne seront pas tous des scientifiques de carrière. Cette formation, qui se veut une formation générale, est tout de même très chargée au niveau des contenus, ce qui pose des difficultés aux étudiants plus faibles.

D'un autre côté, les recherches sur les enjeux de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences au niveau postsecondaire, qui sont nombreuses à avoir été menées à l'étranger, n'ont toutefois que peu souvent été réalisées en sol québécois, avec les étudiants collégiaux. En fait, en ce qui a trait à la recherche didactique en chimie au niveau postsecondaire, sur les conceptions alternatives en particulier, aucune recherche n'a été menée au Québec. Si les résultats des recherches étrangères se transposent peut-être dans le contexte québécois, il demeure qu'une forme de validation de cette transférabilité est nécessaire, pour s'assurer que les conclusions des écrits scientifiques peuvent réellement être appliquées aux étudiants collégiaux québécois.

Au-delà de cette validation scientifique, il est aussi possible que les enseignants à qui s'adressent des recommandations éducatives soient moins portés à accepter des conclusions de recherches qui ont été menées avec des populations étudiantes différentes de la leur. Cela serait possible s'ils ressentaient que les différences culturelles ou éducatives séparant leur pays de celui où les recherches auraient été menées étaient suffisamment grandes pour rendre moins crédible une partie des résultats de recherche publiés. Pour contourner cette difficulté, qui s'ajoute à celles de faire entrer les résultats de recherche dans les classes de façon générale, une recherche menée dans le contexte québécois pourrait aider à convaincre les enseignants québécois de la réalité des difficultés d'apprentissage en science de leurs étudiants.

Ainsi, l'éducation scientifique à cet ordre particulier d'enseignement, dans un contexte francophone unique en Amérique du Nord, à des étudiants qui arrivent nombreux grâce à la gratuité scolaire des cégeps, et qui étudient des contenus scientifiques de haut niveau, constitue un contexte particulier pour la recherche éducative. C'est dans ce contexte que s'inscrit la recherche qui sera présentée dans cette thèse.

Il demeure que les résultats de cette recherche seront probablement généralisables à d'autres contextes éducatifs. En effet, les concepts étudiés en chimie vers 17-18 ans sont très semblables à travers le monde, et les conceptions alternatives que développent les étudiants de chimie dépassent les barrières des origines ethniques et de la langue (Wandersee et coll, 1994). Les conclusions que proposeront cette recherche seront ainsi pertinentes dans d'autres contextes que celui où elle a été menée.

1.4.6 Taxonomie basée sur le raisonnement

Pour prendre en compte les conceptions alternatives, il peut être nécessaire de les classer dans un modèle taxonomique. Toutefois, une taxonomie des conceptions seule n'a pas de pouvoir explicatif. Driver et Easley indiquaient déjà dans les années 1970 qu'on ne ferait un véritable progrès éducatif que lorsqu'on comprendrait vraiment les raisons du développement des conceptions alternatives (Driver & Easley, 1978). Depuis une douzaine d'années, la recherche a fait certains efforts en ce sens à propos des conceptions en chimie (Furió, Calatayud, Barcenás, & Padilla, 2000; García Franco & Taber, 2009; Talanquer, 2006), que les chercheurs ont tenté de regrouper autour de modes de raisonnement communs.

Talanquer (2006) a ainsi proposé un cadre interprétatif intéressant pour la foule de conceptions alternatives en chimie trouvées dans les dernières années. Il considère que toutes les difficultés, qu'elles soient *misconceptions*, *naive beliefs*, « présupposés phénoménologiques », etc., peuvent se réduire à un nombre fini, bien qu'encore non défini, de types de raisonnements et de présuppositions. Il semble pertinent de tenter de réduire le nombre et la variété des façons dont les étudiants arrivent à une mauvaise réponse (prédiction ou explication d'un phénomène) à un plus petit dénominateur, afin de proposer de façon réaliste des pistes de solutions d'enseignement pour une grande variété de problèmes. Cette posture s'inscrit dans le cadre piagétien qu'ont adopté Driver et Easley (1978) lorsqu'ils avancent que pour produire une explication, l'esprit humain doit s'appuyer sur un raisonnement et des connaissances. Il semble donc utile de distinguer les conceptions des erreurs qu'elles amènent dans les prédictions ou les explications pour produire un cadre explicatif qui en prendrait en compte tous les types.

Talanquer (2006) a ainsi cherché à mettre en lumière les présuppositions à propos du comportement de la matière et les façons de raisonner des étudiants associées à ces

présuppositions qui sous-tendent leurs conceptions alternatives. Pour ce faire, il a réalisé un inventaire des écrits scientifiques rapportant des conceptions alternatives en chimie. Pour chaque conception alternative rapportée dans les écrits, il a tenté d'induire le mode de raisonnement ou les présuppositions qui pouvaient raisonnablement l'expliquer. Son modèle du raisonnement de sens commun en chimie vise à aider les enseignants à mieux comprendre les conceptions alternatives de leurs étudiants, voire même à leur fournir des outils pour anticiper leur développement. Bien que ce modèle demeure hypothétique, car développé à partir de données de seconde main, l'intention de Talanquer est intéressante et cette avenue pour classifier les conceptions alternatives semble fertile.

D'autres chercheurs en didactique de la chimie ont aussi enjoint leurs collègues à chercher une façon d'organiser les conceptions pour mieux les comprendre. García Franco et Taber (2009) ont précisé en ce sens qu'il n'y a eu que peu d'efforts de recherche à propos de la nature et de l'origine des conceptions en chimie au postsecondaire. Cela place les enseignants devant un paradoxe : on leur demande de prendre en compte dans leur enseignement les conceptions alternatives des étudiants, mais sans qu'ils puissent comprendre comment et pourquoi ces derniers pensent de la façon dont ils pensent (García Franco & Taber, 2009). En plus, devant l'abondance des conceptions alternatives répertoriées, un enseignant peut se trouver démuné quand vient le temps de trouver un dénominateur commun qui pourrait constituer le levier sur lequel s'appuyer pour tenter de stimuler le changement conceptuel chez ses étudiants. Une initiative semblable à celle de Talanquer (2006), appuyée sur des données de recherche, pourrait être une avenue pertinente pour répondre à l'invitation de García Franco et Taber (2009).

Duis (2011), dans un article sur les conceptions alternatives en chimie organique, pointe vers une autre possibilité intéressante : bien que les conceptions alternatives puissent apparaître très individuelles en surface, des résultats de recherche récents permettraient de croire qu'il n'y a qu'un nombre limité de façons de comprendre un concept ou une notion en chimie. Ainsi, il pourrait être raisonnable de viser à regrouper ces façons de comprendre (ou de mal comprendre) selon des caractéristiques qui permettraient d'améliorer l'enseignement pour tous. Le programme de recherche que Duis propose viserait l'identification de ces caractéristiques communes, des caractéristiques selon lui cognitives.

Les cadres interprétatifs les plus fructueux semblent tous considérer les modes de raisonnement des étudiants autour de sujets précis. Il n'existe donc pas encore de cadre explicatif qui considérerait le raisonnement général en chimie qui serait appuyé sur des résultats de recherche ni de cadre sur les concepts étudiés au postsecondaire en particulier.

De plus, la relation de causalité entre les conceptions alternatives et les modes de raisonnement demeure ambiguë dans les écrits : certains auteurs placent les conceptions à l'origine d'un raisonnement incorrect (Driver & Easley, 1978), d'autres au contraire classent les conceptions comme conséquences de raisonnements incorrects (Talanquer, 2006). Il serait judicieux de clarifier la relation de causalité entre conceptions et raisonnements, pour proposer un cadre de lecture rigoureux des écrits de recherche sur le sujet.

1.5 Question générale de la recherche

En résumé, la chimie est un sujet difficile étant donné les concepts nombreux, peu intuitifs et constituant trois domaines de savoir (les domaines macroscopique, sous-microscopique et symbolique). Mais au-delà de ces difficultés d'ordre épistémologique, l'apprentissage des étudiants de chimie peut être en péril lorsqu'il s'appuie sur des fondations instables, teintées de conceptions alternatives. Leur présence peut nuire à la compréhension conceptuelle, et elle peut mener les étudiants à expliquer le comportement de la matière incorrectement et à faire des prédictions inexactes en chimie. Les conceptions alternatives sont réputées répandues et difficiles à repérer dans un cadre traditionnel d'enseignement. De nombreuses conceptions alternatives en chimie ont été mises en lumière par différents groupes de chercheurs internationaux, sans toutefois qu'une telle opération n'ait jamais été réalisée avec des étudiants collégiaux québécois. Le système d'éducation postsecondaire québécois représentant un contexte unique, une étude des difficultés particulières de ces étudiants est nécessaire pour tracer un portrait juste de la situation.

De plus, des chercheurs proposent aujourd'hui de ne pas faire uniquement l'inventaire des conceptions, mais de s'attarder aussi à étudier comment, par quel processus, elles mènent à de mauvaises prédictions ou explications. En effet, ils soutiennent que les catalogues de conceptions ne peuvent pas être facilement utilisés par les enseignants, ce qui devrait pourtant être la raison pour les mettre en lumière : qu'elles soient prises en compte dans l'enseignement. Toutefois, aucune typologie satisfaisante des raisonnements et des conceptions alternatives, qui

serait appuyée sur des résultats expérimentaux, n'existe actuellement dans les écrits de recherche. Plusieurs chercheurs en didactique de la chimie suggèrent qu'une telle typologie est nécessaire et devrait mettre en lumière les modes de raisonnement qui mettent en jeu ces conceptions alternatives. L'explicitation du raisonnement employé par les étudiants serait ainsi la voie permettant de repérer la conception alternative sur laquelle ce raisonnement s'appuie.

Ainsi, ces préoccupations ont inspiré la question de recherche suivante :

Quelles conceptions alternatives et quels processus de raisonnement mènent les étudiants à faire de mauvaises prédictions en chimie ou à donner de mauvaises explications du comportement de la matière?

C'est pour fournir une réponse à cette question que cette recherche doctorale a été menée.

2 Cadre conceptuel

La recherche présentée dans cette thèse est en grande partie exploratoire. La recension d'écrits esquisse ainsi un cadre conceptuel plutôt qu'un cadre théorique comme dans la recherche vérificatoire (Van der Maren, 1996). Cette recherche est exploratoire au sens où la méthodologie déployée cherche à répondre à des questions de recherche peu documentées pour la population visée, à l'aide d'un outil de collecte de données nouveau.

2.1 Savoirs, connaissances et difficultés d'apprentissage en chimie

Avant de parler des difficultés d'apprentissage en chimie, dont certaines feront l'objet de la présente recherche, cette section présente ce que sont les savoirs et les connaissances qui constituent la chimie comme discipline scientifique et comme discipline enseignée. Même si dans le langage de tous les jours, « savoirs » et « connaissances » peuvent paraître synonymes, la distinction entre ces concepts est importante. Reuter, Cohen-Azria, Daunay, Delcambre, et Lahanier-Reuter (2013) la précisent bien :

« D'un point de vue épistémologique, on distingue généralement *savoirs* et *connaissances*. Avec la notion de *savoirs*, est visé le caractère à la fois institué (construit socialement et historiquement), objectivé (construction d'un système théorique, formalisation, etc.), dépersonnalisé et décontextualisé de la connaissance. Avec la notion de *connaissances*, c'est un point de vue subjectif qui est envisagé : les connaissances d'un sujet sont le résultat intériorisé de son expérience, qui repose sur une recomposition à usage personnel des expériences et des savoirs » (Reuter et coll., 2013, p. 43).

Ainsi, les savoirs sont ce qui constitue la discipline, et les connaissances sont les portions du savoir que possède un individu. La définition de Reuter et de ses collaborateurs est résolument constructiviste : les savoirs sont construits, ils n'existent pas en tant que tel. Le constructivisme en enseignement présuppose la même construction, cette fois au niveau des connaissances : les connaissances sont construites, c'est l'apprentissage.

Le constructivisme dans l'apprentissage ne sous-entend pas un relativisme des connaissances, comme on lui reproche parfois. Il ne signifie pas non plus que les enfants sont laissés à eux-mêmes, à leurs intérêts et à ses besoins. Il ne s'oppose en fait qu'à la pédagogie de la transmission du savoir où le rôle de l'enfant n'est que passif. Le constructivisme, comme paradigme de l'enseignement-apprentissage, prévoit que l'apprenant « construit son savoir à

partir d'une investigation du réel, ce réel comprenant aussi le savoir constitué sous ses différentes formes (magistrale, médiatisée, documentaire...) » (Astolfi et coll., 2008, p. 46). Ainsi, la construction du savoir passe aussi par des situations de classe collectives, où le travail de construction se fait, individuellement, par chaque membre de la classe.

En psychologie cognitive, on a tendance à parler de « connaissances objectivées » comme étant les constituantes du savoir, et de « connaissances individuelles » comme étant les constituantes de la cognition (Raynal & Rieunier, 1997, éd. 2005). Dans les deux cas, ces connaissances sont vues comme des savoirs, preuve que la distinction de Reuter et ses collaborateurs trace une ligne pour séparer deux construits véritablement interreliés.

Les connaissances, dans les écrits pédagogiques, font référence tour à tour aux connaissances que possèdent les individus, soit les représentations adéquates et vraies faisant partie de leurs structures cognitives, et aux connaissances extra-individuelles, soit les énoncés constituant la discipline de laquelle ils constituent la somme de savoirs (Raynal & Rieunier, 1997, éd. 2005). Lorsqu'elles sont intériorisées, les connaissances deviennent des savoirs détenus. Elles passent par un processus de transformation interne, parfois de déformation, et ne se retrouvent pas intactes dans la tête des individus. Plusieurs facteurs affectent le processus de la cognition, comme des facteurs d'habileté de traitement, des facteurs socioaffectifs et des facteurs environnementaux. C'est à la suite de ces transformations plus ou moins réussies que les énoncés deviennent des savoirs détenus. C'est aussi par ce processus qu'on peut expliquer la présence d'artéfacts inattendus dans les structures cognitives d'étudiants dans une classe, puisque l'enseignant ne contrôle que jusqu'à un certain niveau le processus de construction des connaissances, qui relève avant tout d'une opération personnelle et individuelle des étudiants.

Les savoirs sont de nature variée. On parle de savoir savant, de savoir à enseigner et de savoir enseigné dans la transposition didactique, qui sera traitée plus loin, à la section 2.4. On parle aussi de savoir, savoir-faire et savoir-être dans le cadre conceptuel de l'approche par compétences. Ces différents types de savoirs correspondent approximativement aux connaissances déclaratives (« savoir que ») et procédurales (« savoir comment ») du champ sémantique du cognitivisme (Raynal & Rieunier, 1997, éd. 2005) : les connaissances déclaratives sont un savoir, et les connaissances procédurales sont un savoir-faire. Le savoir-être relève quant à lui du domaine affectif et se détache du domaine cognitif. On ajoute généralement les connaissances conditionnelles au trio des connaissances, celles-ci étant les

connaissances à mettre en action pour choisir quand appliquer quelles connaissances déclaratives ou procédurales (Tardif, 1992).

Les difficultés que rencontrent les étudiants de Sciences de la nature sont de plusieurs ordres. D'abord, il est largement reconnu que les outils mathématiques nécessaires pour appréhender plusieurs domaines scientifiques représentent un obstacle, sinon un filtre, décourageant même certains étudiants de tenter leur chance en sciences au niveau collégial (Driver & Easley, 1978).

De plus, la façon même dont la science est constituée fait d'elle un sujet aride. En décrivant le monde, la science est construite d'énoncés, qui sont des énoncés d'observation, des lois, des modèles. Ces énoncés peuvent avoir l'air d'une description sans nuance du monde matériel, mais ils sont construits à partir d'observations humaines, avec toutes les imprécisions et les erreurs d'interprétation que cela peut entraîner. Toutefois, on rapporte que plusieurs apprenants ont tendance à confondre les modèles scientifiques et le monde réel (Astolfi et coll., 2008). Cette vision positiviste du monde les empêche de comprendre que les énoncés du modèle scientifique ne sont pas applicables dans tous les contextes. « [...] La fonction essentielle des énoncés scientifiques est d'être utilisables comme outils intellectuels » (Astolfi et coll., 2008); or, lorsque les étudiants sont incapables de remettre en question l'apparent dogmatisme de ces énoncés, ils ont tendance à essayer de faire entrer leurs propres observations dans le modèle, plutôt que de choisir le modèle expliquant le mieux leurs observations.

2.2 Analyse didactique du contenu

Cette recherche porte sur un certain nombre de concepts de chimie, qui se situent du côté de la chimie descriptive, celle permettant de faire le pont entre le comportement de la matière et les modèles qui permettent de l'expliquer. La sous-section qui suit, 2.2.1, « Grandes idées en chimie [...] » explique quels sont les concepts retenus pour la recherche. Dans une perspective d'analyse didactique, ces concepts ont de plus été définis à l'Annexe A, qui aidera le lecteur moins accoutumé à ces contenus de comprendre la suite de la recherche. L'Annexe C (Carte conceptuelle) reprend ces notions de chimie de manière plus synthétique.

Puis, à la sous-section 2.2.2, « Les énoncés propositionnels [...] », il sera expliqué comment l'analyse didactique a été poursuivie pour détailler le contenu pertinent dans cette recherche en blocs distincts, nommés énoncés propositionnels. L'Annexe B fait la liste de ces

énoncés propositionnels. Chaque énoncé propositionnel est aussi mis en caractères gras dans l'Annexe A : Notions de chimie, pour permettre au lecteur de voir clairement le parallèle entre ces deux annexes.

Enfin, pour compléter l'analyse didactique, une recension des écrits a été réalisée, afin de répertorier les conceptions alternatives des étudiants sur ces concepts. C'est cette recension qui est présentée à la section 2.3. Un résumé des conceptions alternatives les plus fréquemment répertoriées par les écrits scientifiques est placé en Annexe D, pour référence future.

2.2.1 Grandes idées en chimie choisies pour cette recherche

Gillespie (1997) propose les six grandes idées suivantes comme concepts centraux autour desquels devrait s'articuler l'enseignement postsecondaire en chimie : (i) la nature corpusculaire de la matière; (ii) la liaison chimique; (iii) la forme et la géométrie moléculaire; (iv) la théorie cinétique; (v) la réaction chimique; et (vi) l'énergie et l'entropie.

La recommandation de Taber (2001a) va dans le même sens :

Any meaningful study of chemistry requires learners (1) to have grasped the notion of substance; (2) to appreciate that substances maintain their identity through a change of state; (3) to recognise that during chemical changes (a) the products are different substances to the reactants, yet (b) there is a conservation of matter at a more fundamental level. (p. 130)

La présente étude s'est penchée sur les trois premiers éléments de Gillespie (1997) et les deux premiers de Taber (2001a), plus précisément sur la notion de **molécule**, sur la forme et la **polarité** des molécules, sur les liaisons intermoléculaires et sur les **propriétés observables**, notamment en ce qui a trait aux changements de phase, à la mise en solution et à l'apparence des solides. C'est autour de cette dualité entre les domaines sous-microscopiques et macroscopiques de la chimie que cette recherche a été construite, parce que ce passage entre ces domaines est l'une des plus grandes difficultés des étudiants en chimie (Taber, 2001a).

2.2.2 Les énoncés propositionnels à travers la transposition didactique

Dans les écrits de recherche révisés lors de l'analyse didactique, notamment ceux qui font l'inventaire des conceptions dont il sera question à la section 2.3, les auteurs présentent

tous la conception « scientifique » de leurs notions comme étant un objectif à atteindre au terme d'un enseignement réussi, à laquelle ils opposent les conceptions alternatives qu'ils ont observées dans le courant de leurs recherches. Bien que cette façon de procéder témoigne peut-être d'un cadre explicatif sous-jacent tendant vers un courant plutôt positiviste de l'éducation, il demeure que l'établissement du concept normatif est une nécessité pour la recherche en didactique. L'énoncé « correct », celui énonçant le concept scientifique, est nommé énoncé propositionnel (« *propositional knowledge statement* ») (Treagust, 1988).

L'opération visant à faire ressortir l'énoncé propositionnel « correct », « scientifiquement accepté » à partir du savoir savant relève de la transposition didactique. Ce concept de transposition didactique étant l'un des concepts les plus transversaux aux didactiques disciplinaires (Reuter et coll., 2013), il est pertinent de faire une parenthèse pour présenter sa pertinence dans le cadre d'analyse des résultats visés par la présente recherche. Pour pouvoir être enseignés, les savoirs savants doivent être transposés, parce que les modèles savants sont trop complexes et interreliés pour être compréhensibles a priori par les étudiants (Astolfi et coll., 2008). La transposition didactique existe à deux niveaux : d'abord, la transposition externe, la « mise en texte » (Reuter et coll., 2013), où les savoirs savants sont constitués en savoir à enseigner, puis la transposition interne, où les savoirs à enseigner sont transformés en savoirs enseignés en réalité. Le schéma qui suit présente ces deux niveaux.

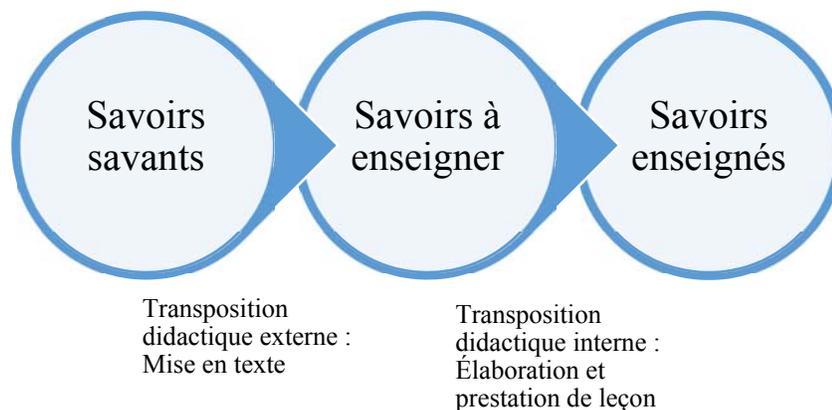


Figure 1 : Les deux niveaux de la transposition didactique

Ainsi, ce qui est enseigné n'est jamais directement les savoirs savants. Le savoir enseigné est un savoir reconstruit, pensé et détaillé spécifiquement en vue d'être enseigné. Les choix réalisés dans l'élaboration de programme, dans la rédaction de manuels, dans la constitution des plans-cadres de cours et même dans la préparation au quotidien sont des choix didactiques et s'inscrivent dans la transposition didactique. Si, en sciences naturelles, les savoirs savants sont manifestement ceux produits par les équipes de chercheurs en sciences naturelles, la source des savoirs de référence à la transposition externe n'est pas toujours aussi évidente. Pensons en particulier aux disciplines techniques, aux arts, ou à la formation professionnelle. Dans ces cas-là, la transposition didactique se base d'abord sur des pratiques sociales de référence (Martinand, 1986). Les pratiques sociales de références ne sont pas le propre des disciplines hors scientifiques, par contre. En effet, certaines pratiques sociales de référence concernent aussi des disciplines comme la chimie, notamment les habiletés de manipulations en laboratoire, mais aussi les choix qui doivent être réalisés par les scientifiques (et les étudiants, scientifiques en herbe) dans un contexte complexe de laboratoire : quel solvant utiliser, à quelle température réaliser une expérience, quelle technique d'analyse privilégier, etc.

Ces connaissances qui doivent être développées sont balisées par une forme de mise en texte qui s'appuie sur les pratiques sociales de référence des praticiens de la chimie en laboratoire. Comme plusieurs de ces pratiques peuvent aussi se baser sur des a priori teintés de conceptions alternatives, il importe de les considérer comme telles. En particulier, lorsque vient le temps de choisir un solvant approprié pour réaliser une expérience, la conception alternative selon laquelle la mise en solution de composés moléculaires implique une réorganisation des molécules en d'autres molécules, ou celle selon laquelle les alcools sont des solvants très polaires, peuvent amener la prise de décisions inadéquates.

La transposition didactique externe concerne donc le passage du savoir savant et des pratiques sociales de références vers le savoir à enseigner. Cette relecture des savoirs de référence en général doit être faite en ayant à l'esprit le contexte éducatif auquel elle s'adresse. Une façon de présenter la reconstruction des savoirs à l'issue de la transposition est de les constituer en énoncés propositionnels. Les énoncés propositionnels sont des phrases déclaratives qui, chacune, présente une pièce de l'ensemble du puzzle disciplinaire à enseigner.

Comme mentionné plus tôt, des énoncés propositionnels ont été rédigés à l'issue de l'analyse didactique des contenus. Ces énoncés, au nombre de trente-et-un, sont présentés à

l'Annexe B. Ils délimitent l'étendue des notions de chimie sur lesquelles porte la présente recherche. Le processus suivi pour leur rédaction et leur validation par des experts de contenus sera présenté au chapitre 4 « Méthodologie », plus précisément à la section 4.5.2.

2.3 Conceptions alternatives

Les prochaines sous-sections poursuivent l'analyse didactique en faisant la recension des écrits de recherche qui traitent des conceptions alternatives des étudiants sur les concepts choisis plus tôt. Ainsi, afin de cerner les principales difficultés potentielles lors de l'apprentissage de la notion de molécule, de la polarité, des liaisons intermoléculaires et de leur impact sur les propriétés macroscopiques de la matière, un inventaire de la recherche sur les conceptions alternatives a été effectué, notamment à partir de la bibliographie de Pfundt et Duit (2009) et des articles de recherche récents publiés à travers le monde.

Les conceptions sont répertoriées dans quatre sections : la nature corpusculaire de la matière (incluant entre autres la notion de molécule); la liaison chimique (qui parle des liaisons intramoléculaires et intermoléculaires); la forme des molécules (la géométrie et la polarité des molécules); et les phénomènes macroscopiques (la mise en solution, l'état de la matière et les changements de phase).

2.3.1 Conceptions sur la nature corpusculaire de la matière

On désigne par « nature corpusculaire de la matière » l'idée selon laquelle la matière est constituée de particules discrètes, indestructibles et dotées de propriétés périodiques. Ce concept regroupe à la fois la théorie atomique et la théorie cinétique des gaz, deux théories enseignées au cégep, la seconde parce qu'elle concerne un sujet d'étude dont les conditions sont plus faciles à modifier et à étudier (Harrison & Treagust, 2002). Très jeunes, les enfants sont mis en contact avec le concept de l'atome, à travers les médias par exemple (Johnson, 1998). Des conceptions naïves sur ces particules peuvent dès lors se développer. Toutefois, les conceptions alternatives qui sont répertoriées ici concernent des élèves et étudiants de la fin du secondaire jusqu'à l'université; leurs conceptions alternatives sont le plus souvent causées par une combinaison de vestiges de théories naïves et de lacunes résultant d'un apprentissage précédent.

Johnson (1998), grâce à une étude longitudinale, a déterminé quatre modèles mentaux différents sur la nature corpusculaire de la matière chez des élèves de 11 à 14 ans. Les modèles mentaux sont un ensemble de conceptions alternatives, de concepts scientifiques, d'intuitions et d'autres idées sur lesquels les étudiants s'appuient pour raisonner sur un sujet. Au niveau du modèle X, les élèves croient que la matière est continue. S'ils adhèrent au modèle A, les élèves savent qu'il y a des particules, mais ils croient que ces particules sont distribuées dans une substance continue. Au modèle B, ils ont une notion corpusculaire de la matière, mais croient que les particules qui constituent une substance ont les mêmes propriétés que celle-ci. Ce n'est qu'au niveau du modèle C que les élèves ont une conception conforme à la théorie scientifique acceptée, en considérant que les particules constituent la substance et que les propriétés de celle-ci sont collectives. De nombreuses études ont observé et décrit des conceptions alternatives relatives à ces modèles; en voici un aperçu.

2.3.1.1 La discontinuité de la matière

L'idée de matière se développe tôt chez les enfants (Krnél, 1998), mais la conception alternative selon laquelle la matière est continue demeure chez la majorité d'entre eux jusqu'à un âge assez avancé. Aux États-Unis, on enseigne la nature corpusculaire pour la première fois en 7^e année. Toutefois, dans une étude auprès d'élèves de 14-15 ans dans le cadre de laquelle on leur demandait de représenter l'air à l'échelle moléculaire, la majorité des élèves démontraient qu'ils avaient encore une conception continue de la matière (Krajcik, 1989). On a également observé cette conception alternative chez des étudiants du postsecondaire, au Canada (Griffiths & Preston, 1992) et en Turquie (Ayas, Özmen, & Çalik, 2010), lorsqu'on demandait aux participants de faire une représentation du modèle sous-microscopique de la matière. Dans les deux études, les élèves représentaient effectivement des particules, mais en contact étroit, laissant supposer qu'ils conservaient cette idée voulant que la matière soit continue, même s'ils connaissaient l'existence des atomes et des molécules.

Selon le modèle de Johnson (1998) mentionné précédemment, cette conception alternative est semblable au modèle A, qui prétend que les particules existent au sein d'une substance continue. Cette conception est prévalente chez des élèves d'âges variés (Garnett et coll., 1995; Harrison & Treagust, 2002; Nakhleh, 1992). Gabel, Samuel et Hunn (1987) ont rapporté la présence de cette conception chez des enseignants du primaire en formation initiale.

Plusieurs d'entre eux, même parmi ceux qui avaient étudié la chimie au secondaire ou au collège, dessinaient un trait au-dessus des molécules en phase liquide, suggérant la présence d'une substance dans laquelle auraient baigné les particules.

Si les élèves acceptent mal l'existence des particules tel que le modèle scientifique le conçoit, ils auront d'autant plus de mal à expliquer certains phénomènes comme la condensation ou l'évaporation, pour lesquels le modèle corpusculaire de la matière fournit une bonne puissance explicative. Dans une étude turque (Ayas et coll., 2010), des élèves de la fin du secondaire et des étudiants en début de parcours universitaire avaient de la difficulté à expliquer la présence d'un liquide sur la paroi extérieure d'un verre rempli d'eau froide : certains d'entre eux allaient même jusqu'à croire que l'eau avait traversé le verre, démontrant une incompréhension de la structure du verre et probablement la méconnaissance de la nature corpusculaire de l'eau sous forme de vapeur dans l'air. La même question posée à des étudiants universitaires américains en science et en génie ne recueillait que 67 % de bonnes réponses (Mulford & Robinson, 2002). L'évaporation est le pendant de la condensation, et une étude américaine (Lee, Eichinger, Anderson, Berkheimer, & Blakeslee, 1993) montre que si les élèves ne comprennent pas la présence de particules d'eau dans l'air, ils ne savent pas non plus expliquer l'apparente « disparition » de l'eau qui s'évapore. En réalité, puisqu'ils conçoivent mal la présence des particules d'eau, ils expliquent l'évaporation comme étant en fait la transformation de l'eau en air (Lee et coll., 1993) ou même la disparition pure et simple de la matière (Ayas et coll., 2010).

Albanese et Vicentini (1997), à la suite de la révision de plusieurs articles qui pointaient dans le même sens, recommandent que les éducateurs ne sous-estiment pas les profondes implications épistémologiques liées au passage d'une conception préscientifique de la structure de la matière comme étant continue à celle de la matière discontinue. La présence de vestiges d'une vision de la matière comme étant continue même chez des étudiants plus vieux en est la preuve.

2.3.1.2 Les propriétés des atomes et des molécules

Un des modèles mentaux déterminés par Johnson (1998) à propos de la nature corpusculaire de la matière, à savoir le modèle B, regroupe les élèves croyant que les particules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent. Selon de nombreuses recherches,

cette conception est présente chez les élèves de la fin du secondaire et les étudiants universitaires. Dans plusieurs études, on posait aux participants la question suivante : quelles propriétés de la substance un atome isolé conserverait-il? Dans tous les cas, la majorité des répondants croyaient qu'au moins certaines propriétés physiques de la substance seraient conservées : la couleur, la malléabilité, l'odeur, la conductibilité électrique ou le point de fusion (Ben-Zvi, Eylon, & Silberstein, 1986; Mulford & Robinson, 2002; Othman et coll., 2008). Il semble que cette conception en particulier reste prévalente même chez les étudiants universitaires parce qu'on n'étudie jamais directement cette notion dans le programme scolaire (Mulford & Robinson, 2002).

D'autres études mettent en lumière cette conception dans la tentative d'explication d'un processus. Par exemple, pour expliquer que les gaz prennent de l'expansion sous l'effet de la chaleur, plusieurs élèves ont recours à la justification suivante : c'est parce que les molécules prennent de l'expansion (Ayas et coll., 2010; Griffiths & Preston, 1992; Lee et coll., 1993). De la même façon, des élèves expliquent le refroidissement d'une substance par le fait que les molécules deviennent plus froides (Lee et coll., 1993). Ce type d'explication pseudomoléculaire peut donner à penser aux élèves, à tort, qu'ils invoquent correctement le domaine sous-microscopique pour expliquer les observations macroscopiques, alors qu'en réalité ils transfèrent aux molécules les propriétés de la matière dans un modèle tautologique (Taber, 2001a).

Pire encore, certains élèves, au niveau postsecondaire, croient que les molécules d'eau deviennent bleues au contact de l'encre bleue (Ayas et coll., 2010), ou alors que les atomes sont vivants parce qu'ils bougent (Griffiths & Preston, 1992). Cette dernière conception, qui peut paraître trop grotesque pour être vraiment rencontrée, est toutefois partagée par 4 personnes sur 10 d'un échantillon d'étudiants postsecondaires à la performance scolaire élevée, dans une étude canadienne (Griffiths & Preston, 1992)! Un cinquième étudiant sur les dix croyait, quant à lui, que seuls les « atomes organiques » étaient vivants, démontrant une conception vitaliste dépassée depuis le 19^e siècle.

Selon Albanese et Vicentini (1997), une façon pour les enseignants de traiter le problème des nombreuses conceptions alternatives sur la nature corpusculaire de la matière chez les élèves est de prendre le temps d'expliquer les limites d'applicabilité des modèles enseignés, de façon à rendre claires les règles du jeu de la modélisation, une activité scientifique centrale.

2.3.1.3 Notion de molécule, notion de composé ionique

Plusieurs études répertoriées visent la détection de conceptions d'élèves quant à la nature des composés ioniques ou des solides métalliques (Coll & Treagust, 2003; De Posada, 1997; Oversby, 1996). Une conception alternative très répandue concerne la distinction entre composé ionique et entité moléculaire. Au-delà des liaisons différentes qui les constituent, la différence majeure entre les deux est qu'un composé ionique a une structure en réseau continu alors que les entités moléculaires sont des entités discrètes. Mais des auteurs rapportent que plusieurs élèves et étudiants croient que les composés comme le chlorure de sodium, un composé ionique, existent sous forme de molécules (Butts & Smith, 1987; Coll & Taylor, 2001; Othman et coll., 2008). Cette conception traduit bien plus qu'une erreur de nomenclature; les propriétés des composés ioniques et des entités moléculaires sont fondamentalement différentes et mal le comprendre peut mener les élèves à prédire incorrectement les propriétés des uns et des autres.

2.3.2 Conceptions sur la liaison chimique

Étant donné les difficultés qu'éprouvent les élèves et les étudiants quant à la nature corpusculaire de la matière, il n'est pas surprenant qu'ils peinent également à comprendre le concept tout juste en amont, soit la liaison chimique (Garnett et coll., 1995). S'il y a de nombreuses études sur la détermination des conceptions alternatives au sujet de la nature corpusculaire de la matière chez les élèves de la fin du secondaire et les étudiants universitaires, il y en a encore plus qui visent les conceptions au sujet de la liaison chimique.

Taber et Coll (2002) donnent une idée juste du caractère central de la liaison chimique dans le domaine de la chimie : en effet, puisque la matière est constituée de particules, c'est le lien entre celles-ci qui est utilisé pour expliquer les propriétés physiques et chimiques d'une substance. Les réactions chimiques impliquent le bris et la formation de liaisons chimiques, alors l'intensité des différentes liaisons est déterminante pour la thermodynamique des réactions. La liaison chimique est arbitrairement divisée en différents types de liaisons, parmi lesquels la liaison covalente et la liaison ionique et constituent la dichotomie la plus commune, la liaison covalente résultant d'un partage d'électrons alors que la liaison ionique résulte du transfert d'un électron (voir, par exemple, Hill, Petrucci, McCreary, Perry, & Cantin, 2008). Toutefois, il est plus juste de considérer la liaison chimique comme un continuum, aucune liaison n'étant purement ionique ou purement covalente (Taber, 2001a). Par exemple, de très

nombreuses liaisons covalentes, dont on dit qu'elles résultent d'un partage d'électrons, sont polaires, ce qui implique que le partage des électrons n'est pas équitable entre les atomes. Il est toutefois utile de comprendre la distinction entre covalent et ionique, à tout le moins pour classifier les liaisons selon une « première approximation » (Taber et Coll, 2002). Levy Nahum et ses collaborateurs (2010) ont proposé une échelle qualitative des intensités relatives des liaisons chimiques. Comme la liaison chimique décrit un continuum allant des forces de Van der Waals, les liaisons les plus faibles, jusqu'aux très fortes liaisons ioniques, il est normal que certaines intensités se chevauchent. La figure 2 (Voisard & Cormier, 2013) présente cette échelle d'intensité des liaisons chimiques.

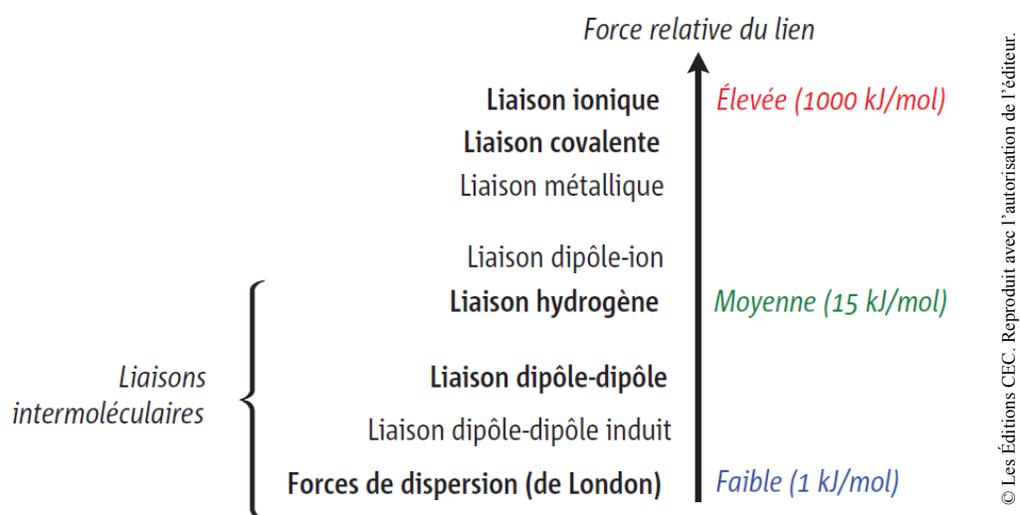


Figure 2 : Continuum de l'intensité relative des liaisons chimiques

2.3.2.1 Intensité relative des liaisons

Plusieurs élèves et étudiants éprouvent de la difficulté à comprendre l'intensité relative des liaisons. Des élèves de la fin du secondaire croient que les liaisons ioniques, métalliques ou covalentes sont faibles (Coll & Taylor, 2001), souvent en invoquant la texture de la substance pour justifier leur explication : les métaux doivent avoir des liaisons faibles, puisqu'ils sont malléables; les sels sont friables, donc les liaisons ioniques qui les constituent doivent être faibles. D'autres études rapportent le même genre de conception sur la force des liaisons covalentes (Othman et coll., 2008; Peterson, Treagust, & Garnett, 1989).

Par ailleurs, une étude avec des étudiants universitaires de chimie démontre que certains d'entre eux croient que la liaison hydrogène est la liaison la plus forte (Nicoll, 2001). Cette conception peut s'expliquer par le fait que c'est la plus forte des liaisons intermoléculaires, ce sur quoi les enseignants insistent beaucoup dans le but de les distinguer des liaisons de Van der Waals, mettant vraisemblablement trop l'accent sur la « force » des liaisons hydrogène au détriment de leur position relative dans le continuum.

2.3.2.2 Liaisons intermoléculaires

Par ailleurs, quelques études visaient spécifiquement la liaison hydrogène (Henderleiter, Smart, Anderson, & Elian, 2001; Schmidt, 1996), cette liaison intermoléculaire suffisamment intense pour avoir une grande importance sur l'état physique des substances et leur réactivité. Il est important de distinguer les molécules qui peuvent faire une liaison hydrogène et celles qui ne le peuvent pas. Pour que la liaison hydrogène soit possible, la molécule doit contenir un petit atome très électronégatif (premier critère) auquel un atome d'hydrogène est lié (deuxième critère). On a observé des demi-raisonnements à ce sujet, un des deux critères seulement étant pris en considération par les étudiants (Henderleiter et coll., 2001; Schmidt, 1996).

Ainsi, certains étudiants croyaient que toute liaison covalente mettant en jeu un atome d'hydrogène était une liaison hydrogène, confusion vraisemblablement issue du nom de la liaison. Cette conception alternative a un impact sur la distinction entre liaison covalente intramoléculaire et liaison intermoléculaire. D'ailleurs, Peterson et ses collaborateurs ont documenté la confusion entre « intramoléculaire » et « intermoléculaire » (1989). Enfin, d'autres étudiants confondaient la formation d'une liaison hydrogène avec une réaction chimique de déshydratation (Henderleiter et coll., 2001). Considérant l'importance des liaisons intermoléculaires pour expliquer les phénomènes macroscopiques comme les changements de phase, ces conceptions peuvent avoir un impact négatif sur la suite de l'apprentissage de la chimie.

2.3.2.3 Polarité des liaisons

Il a été mentionné précédemment que les liaisons chimiques covalentes, dans de nombreux cas, présentent un partage inégal des électrons de la liaison. On nomme de telles liaisons les liaisons covalentes polaires. Le partage des électrons se prédit par la différence entre

les valeurs de l'indice d'électronégativité des deux atomes qui sont liés : plus la différence entre l'électronégativité de chacun des atomes est grande, plus la liaison est polaire. L'échelle d'électronégativité provient de données empiriques et décrit l'attraction relative des électrons d'une liaison par les deux atomes liés (Hill et coll., 2008).

Les apprenants peuvent être incertains quant aux caractéristiques des liaisons polaires, ou même quant à leur existence. Trois études différentes rapportent que certains élèves de la fin du secondaire (Birk & Kurtz, 1999; Peterson et coll., 1989) ou certains étudiants universitaires (Nicoll, 2001) croient que les liaisons sont polaires quand le partage des électrons est égal entre les deux atomes, alors que c'est en réalité le contraire. Cette conception est surprenante et mériterait qu'on l'examine : est-ce que les apprenants ne font qu'inverser la terminologie, ou alors leur incompréhension est-elle plus profonde?

Une de ces études (Birk et Kurtz, 1999) rapporte quatre autres conceptions alternatives sur la polarité des liaisons : (1) la polarité d'une liaison dépendrait du nombre d'électrons de valence de chaque atome lié; (2) la charge ionique des atomes liés déterminerait la polarité d'une liaison; (3) les électrons non liants influenceraient la position des électrons partagés et déterminent la polarité de la liaison; et (4) l'atome le plus volumineux exercerait un plus grand contrôle sur les électrons partagés. Ces diverses conceptions, qui ont en commun d'invoquer une cause incorrecte pour la polarité des liaisons, montrent que le paramètre permettant de prédire la polarité d'une liaison, soit la différence d'électronégativité, est mal compris par les élèves.

2.3.3 Conceptions sur la forme des molécules

La forme des molécules, aussi appelée géométrie moléculaire, décrit la forme que prend l'entité moléculaire dans l'espace. Il y a beaucoup moins de recherches sur l'apprentissage de la géométrie moléculaire que sur l'apprentissage des concepts traités précédemment. Pourtant, on a répertorié un certain nombre de recherches pertinentes; voici un aperçu des conceptions alternatives qu'elles ont permis de mettre en lumière.

2.3.3.1 Ce qui cause la structure

Au niveau du cégep, la théorie enseignée pour prédire la forme d'une molécule est celle de la répulsion des paquets d'électrons de valence (RPEV). Apparemment, cette théorie, selon

laquelle la répulsion entre tous les paquets d'électrons de valence détermine la géométrie de la molécule, est mal maîtrisée et mal appliquée par les élèves et les étudiants. En effet, dans une étude de Peterson et ses collaborateurs (1989), une portion significative d'élèves de la fin du secondaire tentaient de prédire la forme d'une molécule seulement à partir de la répulsion des paquets d'électrons liants (25 % des répondants) ou au contraire seulement à partir de la répulsion des paquets d'électrons non liants (22 % des répondants). Les élèves n'appliquent ainsi qu'une partie des critères décisifs pour prédire une caractéristique, une déficience qu'on verra également dans la section sur la polarité des molécules. Étonnamment, dans une étude transversale avec des élèves du secondaire, des étudiants des trois cycles universitaires et même des membres de la communauté enseignante universitaire, on a observé les mêmes demi-raisonnements, dans des proportions décroissant en fonction de l'âge des participants (Birk et Kurtz, 1999). Il est intéressant de noter que seulement 81 % des professeurs universitaires de chimie parvenaient à prédire correctement la forme d'une molécule simple, les 19 % restants appliquant soit l'un ou l'autre des demi-raisonnements décrits précédemment.

En plus de ces demi-raisonnements, certains élèves et étudiants ont une conception alternative intéressante quant à la prédiction de la géométrie d'une molécule : ils croient que c'est la polarité d'une molécule qui cause la forme de celle-ci (Birk et Kurtz, 1999; Nicoll, 2001; Peterson et coll., 1989). Cette conception, qu'on pourrait appeler de causalité inverse, prend la conséquence pour la cause : en effet, c'est plutôt la polarité de la molécule qui découle de sa forme, et non l'inverse. Une conception de causalité inverse résulte vraisemblablement de la confusion d'un apprenant quant à la relation entre deux paramètres; il aura retenu qu'il y a un lien entre les deux, mais pas dans quel sens celui-ci s'exerce.

2.3.3.2 Polarité des molécules

Comme on l'a vu, les apprenants peuvent avoir des conceptions alternatives au sujet de la polarité des liaisons chimiques et une conception de causalité inverse quant à la polarité des molécules. Les écrits scientifiques ont également relevé des conceptions sur la polarité des molécules elles-mêmes.

Selon la première conception répertoriée, une molécule pourrait être non polaire uniquement si ses liaisons sont non polaires, ce qui mettrait de côté de très nombreuses molécules non polaires comme le CO_2 , qui a deux liaisons très polaires, mais dont les moments

dipolaires s'annulent complètement. Birk et Kurtz (1999) ont observé cette conception chez toutes les catégories d'apprenants de leur étude, des élèves du secondaire jusqu'aux étudiants des cycles supérieurs, et Peterson et ses collaborateurs (1989), chez 34 % des élèves de la fin du secondaire (12^e année).

Deux autres conceptions possibles au sujet de la détermination de la polarité des molécules reposent sur de demi-raisonnements, la première voulant que les molécules soient polaires si leurs liaisons le sont (sans considérer la géométrie) et la deuxième, qu'elles sont polaires si leur structure est asymétrique (sans considérer la polarité des liaisons). Seule la première est répertoriée dans les écrits scientifiques (Birk et Kurtz, 1999), aucune étude révisée ne traitant du potentiel deuxième demi-raisonnement; il serait intéressant de tenter de combler ce manque à la recherche puisqu'il semble probable que certains étudiants aient cette conception alternative. La première conception est peut-être due à une difficulté qu'ont les élèves à visualiser en trois dimensions les molécules pour faire une addition vectorielle qualitative (Bodner & Guay, 1997; Tuckey, Selvaratnam, & Bradley, 1991).

2.3.4 Conceptions sur les phénomènes macroscopiques

Les conceptions alternatives abordées jusqu'à maintenant portaient sur les modèles sous-microscopiques à partir desquels la chimie tente d'expliquer et de prédire le comportement de la matière. Bien qu'on pourrait s'imaginer que les concepts macroscopiques devraient être mieux compris par les apprenants, on observe également des conceptions alternatives au sujet de ceux-ci, la plupart à propos de la difficile relation à établir entre les causes modélisées au domaine sous-microscopique et les conséquences observées au domaine macroscopique.

2.3.4.1 Polarité des substances et mise en solution

Pour faire suite à la polarité des liaisons et à la polarité des molécules, cette sous-section traitera de la polarité des substances, au domaine macroscopique. Il est intéressant de noter que la polarité est la seule propriété de la particule qui peut être directement transférée à la substance : si une substance est polaire, c'est parce que ses molécules sont polaires. Une telle simplicité devrait faciliter l'apprentissage; toutefois, une conception alternative semble très répandue à ce sujet. Plusieurs élèves et étudiants ne semblent pas pouvoir invoquer la polarité des molécules pour expliquer la polarité d'une substance, comme l'eau ou le sucre, par exemple

(Butts et Smith, 1987). Il semble que les apprenants « savent » que l'eau est un solvant polaire, mais qu'ils ne peuvent pas relier ce fait à une quelconque explication, qui impliquerait les vecteurs de moments dipolaires de la molécule (Nicoll, 2001). On a documenté que les apprenants témoignent dans cette situation d'une difficulté à construire des explications transversales entre les domaines du savoir macroscopique et sous-microscopique (Taber, 2001a).

2.3.4.2 État de la matière et changement de phase

On a rapporté que les étudiants ont de la difficulté à prédire le point d'ébullition de composés organiques simples (Butts et Smith, 1987), qui repose sur l'intensité relative des liaisons intermoléculaires que les molécules de ces composés font entre elles. En plus d'éprouver des difficultés avec les liaisons intermoléculaires (voir sous-section précédente), ils utilisent de façon incorrecte le seul critère de la longueur de la chaîne de carbone, plutôt que de différencier les chaînes linéaires et les chaînes ramifiées. D'autres n'invoquaient même pas les liaisons intermoléculaires, mais toute une variété d'autres concepts non pertinents comme le pK_a ou la résonance (Henderleiter et coll., 2001).

En outre, certains apprenants manifestent une conception déconcertante, pourtant documentée par de très nombreux auteurs : l'ébullition entraînerait le bris des liaisons covalentes à l'intérieur des molécules (Bodner, 1991; Butts et Smith, 1987; Henderleiter et coll., 2001; Mulford et Robinson, 2002; Osborne et Cosgrove, 1983; Othman et coll., 2008), conduisant, par exemple, de l'eau qui bout à se transformer en deux gaz, l'un comburant (O_2) et l'autre explosif (H_2), ce qui rendrait toute bouilloire assez dangereuse! Cette conception alternative est un exemple typique de conception issue d'un apprentissage antérieur incorrect, car il est peu probable qu'un individu n'ayant pas étudié la chimie élabore une telle théorie alternative mettant en jeu les éléments constitutifs de l'eau.

Certains étudiants de chimie témoignent toutefois de l'existence possible de conceptions plus naïves quant à l'évaporation de l'eau, en expliquant par exemple que l'eau a réellement disparu d'un verre laissé au soleil, mettant de côté toute notion de la nature corpusculaire de la matière, ou de la conservation de celle-ci (Ayas et coll., 2010).

2.4 L'apprentissage est le changement conceptuel

2.4.1 Tenir compte des conceptions dans l'enseignement

Les enseignants devraient-ils tenir compte des conceptions dans l'enseignement? Une étude de 1998 tend à indiquer que oui. Dans une méta-analyse qui regroupait des données pour près de 6 500 étudiants d'écoles secondaires, de collèges et d'universités américains, Hake (1998) a comparé les résultats à des examens traditionnels et à ceux d'évaluations conceptuelles en physique. Selon ses conclusions, les étudiants ayant suivi un enseignement conceptuel (qui prend en compte les conceptions des étudiants) avaient de meilleurs résultats aux examens conceptuels, mais aussi aux examens traditionnels, que ceux qui n'avaient eu qu'un enseignement traditionnel. Il semble, à la lumière de cette étude, qu'un enseignement tourné vers le changement conceptuel soit plus efficace pour réaliser un apprentissage qu'un enseignement traditionnel en sciences.

La prise en compte didactique (Astolfi et coll., 2008) nécessite qu'après avoir mis en lumière les conceptions des étudiants, on les confronte pour parvenir au changement conceptuel. Des dispositifs didactiques peuvent être mis en place pour favoriser le changement conceptuel et, ainsi, s'assurer d'un apprentissage réussi.

Dans le contexte de l'enseignement des sciences, le véritable apprentissage est défini comme l'atteinte du changement conceptuel (Treagust & Duit, 2008). Ce dernier est bien illustré par Potvin et Thouin : « le défi est clair : il s'agit de faire passer les apprenants de leurs conceptions primitives à des conceptions plus scientifiques » (Potvin & Thouin, 2003, p. 525). Le changement conceptuel « est l'apprentissage dans des domaines où les structures conceptuelles préexistantes à l'instruction chez les étudiants doivent être fondamentalement restructurées afin de permettre la compréhension du savoir enseigné » (Duit & Treagust, 2003, p. 673, traduction libre). Le champ de recherche en éducation qui vise à ce que les conceptions alternatives soient prises en compte dans l'enseignement est celui du changement conceptuel. Que les conceptions alternatives des étudiants soient connues des chercheurs et des enseignants représente bien sûr l'une des assises sur lesquelles le changement conceptuel s'appuie pour mener à des apprentissages réels (Herron, 1996; Posner et coll., 1982; Treagust, 1988).

Autrement dit, avant d'envisager de changer les conceptions alternatives, il faut pouvoir les mettre en lumière.

Le changement conceptuel peut être entrepris par l'enseignant dans une perspective de rupture ou de continuité, d'un point de vue épistémologique ou ontologique, dans le cadre d'activités collaboratives en classe, individuellement à travers un dispositif médiatisé, etc.

En bref, les étudiants faisant l'apprentissage de la chimie ont des conceptions qui diffèrent de la compréhension scientifique acceptée de cette discipline (Özmen, 2004). Ces conceptions nuisent aux nouveaux apprentissages (Astolfi et coll., 2008). Modifier ces conceptions à travers une approche visant le changement conceptuel permettrait, selon toute vraisemblance, la construction chez les étudiants d'un système cohérent et valide de la chimie. Grâce à ce véritable apprentissage, les prédictions qu'ils tenteront de faire des phénomènes naturels seront peut-être plus justes, ce qui est justement la raison d'être de la science. De plus, leurs apprentissages subséquents en chimie pourront se faire sur des bases solides.

En 1982, Posner, Strike, Hewson et Gertzog posaient les bases de la théorie du changement conceptuel en didactique des sciences. Leur postulat de départ était le suivant : « L'apprentissage s'intéresse aux idées, à leur structure et aux indices qui permettent de les reconnaître. Ce n'est plus simplement l'acquisition d'un ensemble de réponses correctes, un lexique ou un ensemble de comportements » (Posner et coll., 1982, p. 212, traduction libre).

Posner et ses collaborateurs tracent un parallèle entre les « révolutions scientifiques », telles que décrites par Thomas Kuhn (1962), et l'apprentissage des sciences. Dans leur théorie, ils reprennent les concepts piagétiens de l'assimilation et de l'accommodation. Ils soutiennent que lorsque les connaissances antérieures des étudiants sont suffisamment cohérentes avec les nouvelles notions qui leur sont présentées, l'apprentissage se fera selon un mode d'*assimilation*. Mais souvent, les idées ou conceptions alternatives des étudiants empêchent d'accepter et d'apprendre les nouveaux concepts à l'étude. Dans ce cas, un changement conceptuel plus radical devra opérer; il s'agit en ce cas d'*accommodation*. Ce changement conceptuel les amènera à adapter ou à modifier leurs structures cognitives. Pour qu'il soit efficace, « l'enseignement de la science devra fournir une base rationnelle au changement conceptuel » (Posner et coll., 1982, p. 223, traduction libre). Plus les étudiants considéreront la divergence entre leurs conceptions et le concept scientifique accepté, plus ils seront insatisfaits de leurs constructions personnelles et ouverts au changement conceptuel.

Les conditions et les modalités pour stimuler le changement conceptuel font actuellement partie des sujets de recherche les plus féconds en sciences de l'éducation, plus particulièrement en didactique. Le processus de recherche dans lequel s'investir est synthétisé par Tsaparlis et Papahotis : « Les méthodes constructivistes d'enseignement requièrent que les enseignants, d'abord, reconnaissent les conceptions alternatives de leurs étudiants et, ensuite, les prennent en considération dans la planification et la prestation de leur enseignement, de façon à ce que l'objectif du changement conceptuel soit rempli » (Tsaparlis & Papahotis, 2009, p. 899, traduction libre).

Mais il ne suffit pas d'inculquer les « bons » concepts aux étudiants. Placés devant les modèles mentaux d'experts, les étudiants ne pourront les intégrer que lorsqu'ils pourront les intégrer à leurs propres structures cognitives. L'apprentissage est donc vu, à travers le cadre de la didactique, comme la construction graduelle, par les étudiants et pour eux-mêmes, des modèles mentaux en accord avec la théorie scientifique acceptée, qui sont les concepts des experts (Astolfi & Develay, 2002). Ainsi, l'apprentissage se définit comme l'atteinte du changement conceptuel.

D'autres modèles du changement conceptuel ont été proposés au fil des années. Parmi ceux-là, notons celui de Vosniadou (1994) et celui de diSessa (1993), qui, bien qu'ouvertement rivaux, demeurent pertinents parce qu'encore très utilisés comme modèles fondateurs dans les programmes de recherche sur le changement conceptuel (Bêty, 2009). Selon Vosniadou, les conceptions alternatives sont des idées en désaccord avec la théorie scientifique dans la tête des élèves; elle propose d'envisager le changement conceptuel dans une perspective de rupture avec ces conceptions, à ce titre en accord avec le modèle de Posner et Strike et leurs collaborateurs (Posner et coll., 1982).

DiSessa considère quant à lui les idées naïves des élèves plutôt comme une collection de connaissances squelettiques, fondatrices, mais désorganisées; il envisage le changement conceptuel dans une perspective de continuité. Pour caractériser ce changement conceptuel, diSessa dit que l'apprentissage (de la physique, en particulier) peut être vu comme la réorganisation des connaissances intuitives et leur approfondissement. Le développement d'un sens commun entre les multiples instances phénoménologiques de l'environnement naturel et le nombre beaucoup plus restreint des idées théoriques fondamentales qui permettent de les intégrer est aussi caractéristique de l'atteinte de l'expertise pour diSessa.

Si ces considérations sur les modèles du changement conceptuel sont présentées ici, même si cette recherche ne traite pas spécifiquement de ce sujet, c'est que la perspective de ces auteurs sur la « logique naïve » des novices permettra d'éclairer le portrait des conceptions alternatives que cette recherche a développé pour répondre à la question générale présentée plus tôt.

2.4.2 Changement conceptuel à travers le temps

Si les conceptions alternatives sont tenaces et résistantes au changement conceptuel dans un contexte traditionnel d'enseignement (Wandersee, et coll., 1994), il demeure que certaines conceptions s'éteignent naturellement à un rythme plus rapide que d'autres à travers les études, alors que d'autres demeurent toujours aussi problématiques, même dans les structures cognitives des étudiants diplômés. Certaines recherches en enseignement de la chimie se sont appliquées à étudier cette « résistance relative » de certaines conceptions.

Une équipe de chercheurs (Park, Light, Swarat, & Drane, 2009) a proposé une progression d'apprentissage classifiant spécifiquement les niveaux de formulation d'étudiants universitaires en sciences sur le concept de modèle atomique. Une progression d'apprentissage est un portrait des différents niveaux de plus en plus sophistiqués de compréhension, de compétence et de connaissance à travers lesquels un apprenant chemine vers l'expertise autour d'une notion fondamentale (Krajcik, 2011). Les niveaux inférieurs de la progression d'apprentissage sont composés de conceptions alternatives. La hiérarchisation des niveaux et leur prise en compte dans le développement des programmes scolaires constituent un enjeu actuel de la recherche américaine sur l'enseignement des sciences.

La méthodologie de recherche de Park et ses collaborateurs (2009) reposait sur deux volets : d'abord, un questionnaire conceptuel fut passé à plus de 400 étudiants pour identifier les conceptions alternatives fréquentes sur l'atome et ensuite des entrevues furent menées avec 15 étudiants pour tenter de cartographier leur progression d'apprentissage. La progression ainsi proposée était divisée en 13 niveaux regroupés selon quatre « modèles scientifiques » (le modèle corpusculaire, le modèle nucléaire, le modèle de Bohr et le modèle quantique).

Leurs résultats montrent que les étudiants, même universitaires, peuvent garder des conceptions alternatives sur le modèle atomique, par exemple associer l'atome à une particule

indivisible, ce que ces chercheurs plaçaient au niveau inférieur de la progression d'apprentissage (le modèle corpusculaire).

D'autres chercheurs ont montré que même des conceptions alternatives encore plus basiques pouvaient subsister dans l'esprit des étudiants quant à la nature sous-microscopique de la matière. En particulier, les études de Griffiths et Preston (1992) et Ayas et ses collaborateurs (2010) dont il a été question dans l'inventaire des écrits de recherche, plus tôt, ont montré que des étudiants au postsecondaire conservaient la conception alternative selon laquelle la matière était continue.

À l'aide d'une recension des écrits scientifiques empiriques présentant des conceptions alternatives sur la nature corpusculaire de la matière, Talanquer (2009) s'est appliqué à trouver une façon de représenter l'évolution conceptuelle des étudiants tout en proposant un moyen aux enseignants de prendre toute la mesure des conceptions alternatives que peuvent avoir leurs étudiants. Son modèle montre bien que l'évolution conceptuelle des étudiants ne va pas de soi : certaines conceptions demeurent, malgré les années passées à étudier un domaine.

D'autres recherches pointent vers le même constat. Taber (1995, 2000), par exemple, dans une recherche longitudinale avec des étudiants du secondaire britanniques en chimie, a noté une certaine variance dans la labilité et la stabilité de leurs conceptions alternatives, certaines perdurant plus que d'autres. Il a interviewé quelques étudiants plusieurs fois durant leurs études, pour suivre leur évolution conceptuelle sur le sujet de la liaison chimique. Le cadre alternatif de l'octet, décrit dans une section précédente de la présente thèse, et fondé sur plusieurs conceptions alternatives, a été observé par Taber dans le raisonnement d'étudiants sur une période de plusieurs mois, malgré leur étude du sujet en classe. Pour d'autres conceptions alternatives, Taber a observé que les étudiants utilisaient un mélange de concepts scientifiques et de conceptions alternatives dans leurs raisonnements, ce qu'il appelle l'utilisation de cadres conceptuels multiples (*multiple frameworks*). Par exemple, un étudiant invoquait correctement les attractions électrostatiques entre les particules sous-atomiques pour décrire la liaison chimique, mais invoquait incorrectement le cadre de l'octet pour l'expliquer. Ces deux systèmes explicatifs, évoqués en parallèle, témoignent de l'existence de cadres multiples dans l'esprit des étudiants, et selon Taber au fur et à mesure que le concept scientifique se construit dans leur esprit.

L'évolution conceptuelle des étudiants, ou la proportion d'entre eux témoignant de la présence de conceptions alternatives, est un aspect pertinent de l'identification des conceptions alternatives chez une population étudiante et permet d'enrichir l'inventaire de conceptions alternatives pour un groupe d'étudiants donné.

2.5 Raisonnement : des idées tacites aux réponses manifestes

Comme mentionné précédemment, la recherche sur l'apprentissage des sciences a répertorié plusieurs conceptions alternatives. À regarder ces nombreux catalogues, les enseignants qui voudraient prendre ces dernières en considération dans leur enseignement, et même les chercheurs qui tentent de proposer des dispositifs didactiques de changement conceptuel, peuvent se sentir dépassés par le nombre et le manque d'organisation de ces conceptions alternatives. Si certains auteurs proposent des façons de les classer selon leur similarité conceptuelle (par exemple Nicoll, 2001; Othman et coll., 2008), d'autres ont plutôt cherché à les catégoriser selon les raisonnements que les étudiants invoquaient lorsqu'ils les mettaient en scène (Furió et coll., 2000; Talanquer, 2006).

La perspective d'Ausubel sur la notion d'apprentissage est intéressante : selon lui, l'établissement et la formulation de relations correctes entre les idées et les concepts en science correspondent à un apprentissage réussi (Ausubel, 1968). Cette conception de l'apprentissage est très pertinente pour le contexte de la présente recherche, qui cherche à étudier les idées et les concepts dans l'esprit des étudiants et la formulation des relations entre eux.

Le raisonnement, dans son acception générale, est l'utilisation de la logique pour produire une conclusion, une inférence ou un jugement (Montminy, 2009); c'est le mécanisme qui permet l'établissement de ces relations entre les idées et les concepts. Selon une perspective constructiviste de l'apprentissage, les idées et les concepts sont reconstruits dans la tête des gens qui font le raisonnement (Tardif, 1997). On n'a pas accès, de l'extérieur, à leurs modèles mentaux; ils sont tacites. Lorsqu'on sollicite une réponse à une question sur ces idées ou ces concepts, on déclenche le mécanisme du raisonnement qui engendre une réponse, qui est, elle, manifeste.

Les écrits de recherche pertinents ont été étudiés dans le cadre de la présente recherche pour trouver la meilleure façon proposée par les auteurs de considérer le lien entre les conceptions alternatives et les raisonnements. À la suite de la consultation de ces écrits de recherche, les quatre déclinaisons suivantes du processus menant du modèle mental (tacite) à la réponse à une question (manifeste) sont proposées ici, pour faciliter la mise en perspective de chaque cas de figure. Ces déclinaisons de la façon un modèle mental tacite mène à une réponse manifeste sont schématisés à la figure 3 et détaillés par la suite; il y sera fait référence de la façon suivante : schémas des *modèles mentaux* → *réponse*.

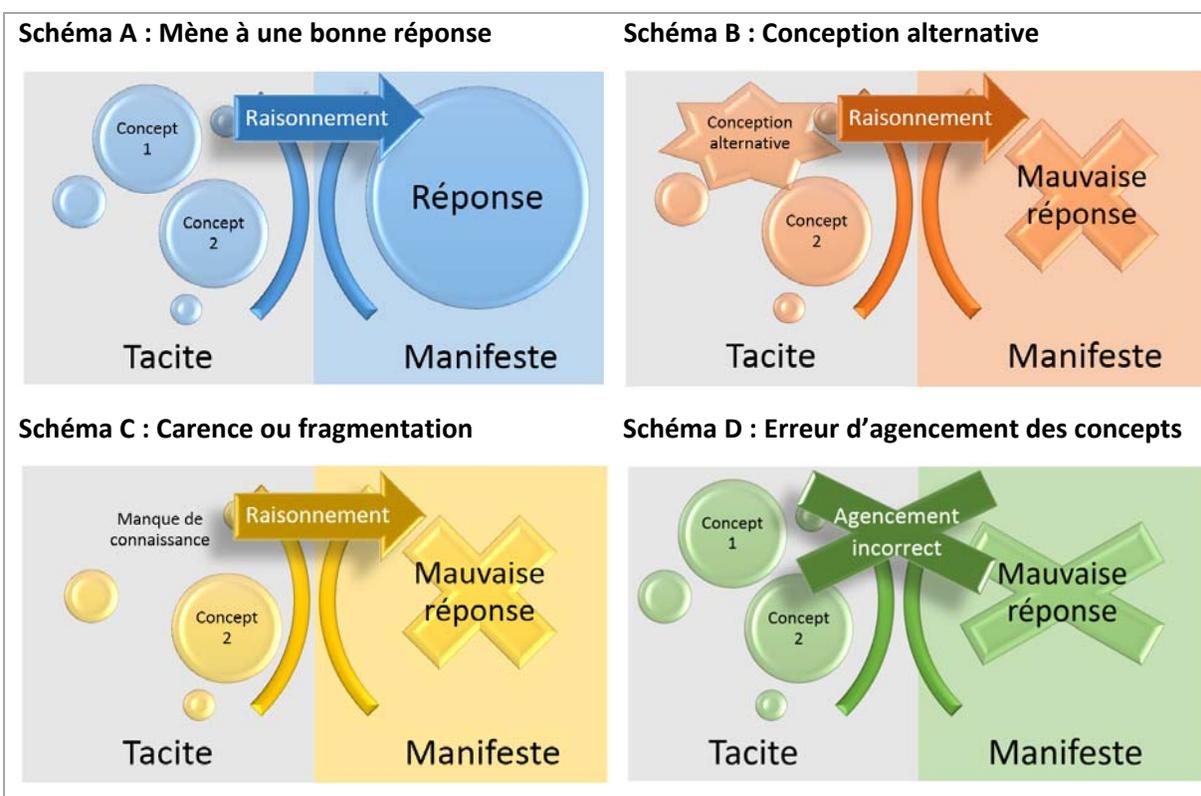


Figure 3 : Les quatre schémas des *modèles mentaux* → *réponse* du processus menant des modèles mentaux (tacites) à la réponse à une question (manifeste)

Au schéma A, le processus conduit une bonne réponse. Cette bonne réponse est manifeste, mais pas les concepts, qui sont tacites, c'est-à-dire dans l'esprit de la personne qui fait le raisonnement et qui donne ensuite la réponse. Le modèle mental de cette personne est cohérent avec la théorie scientifiquement acceptée. Le raisonnement est lui aussi correct : il met en relation les concepts en respectant la logique. Deux concepts sont représentés, mais certains

raisonnements mettent en relation plus ou moins de concepts pour mener à la bonne réponse. On peut dire que l'étudiant qui donne une bonne réponse a donc à la fois les concepts dans son esprit et qu'il les met en relation d'une façon appropriée, par un raisonnement juste.

Il arrive que la réponse ne soit pas en accord avec la théorie scientifiquement acceptée, c'est-à-dire lorsque l'étudiant donne une mauvaise réponse. Au schéma B, cette mauvaise réponse tire son origine de la présence d'une conception alternative du côté des modèles mentaux. Mais cette conception n'est pas la réponse en tant que telle : la conception alternative est la représentation tacite que l'étudiant a en tête, et qui l'a mené à donner cette réponse (la seule manifestation de cette conception). Le raisonnement par lequel la conception alternative se manifeste peut être tout à fait logique et solide, mais peut mener parfois malgré tout à de mauvaises réponses. Le schéma B illustre que la présence d'une conception alternative mène à une mauvaise réponse, parce que le raisonnement s'appuie sur des éléments de connaissance qui ne sont pas tous exacts selon la théorie scientifiquement acceptée.

Un autre processus peut mener à une mauvaise réponse, comme illustré au schéma C, nommé « carence ou fragmentation ». Cette situation se produit lorsqu'un étudiant n'a pas la connaissance nécessaire pour raisonner. Soit cette connaissance ne lui a jamais été enseignée, soit il ne l'a en réalité jamais apprise, ne s'en est jamais construit un modèle mental personnel. Bien entendu, cet obstacle doit être surmonté avant que tout autre apprentissage dans le domaine soit entrepris, car le nouveau matériel risque de ne pas être compris s'il ne peut pas s'attacher sur des connaissances antérieures existantes (Taber, 2001b).

Toujours au schéma C, il est possible que l'étudiant ait effectivement les connaissances nécessaires pour répondre à la question, mais qu'il ne puisse pas les invoquer parce qu'elles ne sont pas disponibles. Un tel étudiant pourrait par exemple avoir appris la notion nécessaire pour faire le raisonnement correct, mais ne même pas savoir qu'il doit utiliser cette notion pour répondre à la question; il ne voit pas la relation entre ses connaissances et le sujet de la question ou du problème qu'on lui pose. On parle alors de fragmentation des connaissances. Il semble difficile, vu l'impossibilité d'avoir accès au côté tacite du schéma, de distinguer les mauvaises réponses provenant d'un obstacle de carence et celles provenant d'un obstacle de fragmentation. Il faudrait pouvoir sonder directement les modèles mentaux des étudiants, dans divers contextes, pour repérer si la connaissance suspecte lui est connue, et qu'il est capable de l'invoquer dans une autre situation. Ainsi, on pourrait confirmer l'obstacle de fragmentation. Sinon, on ne

pourrait que continuer à supposer qu'il s'agit d'un obstacle de carence, jusqu'à preuve du contraire.

Un quatrième cas, menant encore une fois à une mauvaise réponse, peut trouver son explication dans l'opération de raisonnement en tant que tel. C'est ce qui est représenté au schéma D. Selon Driver et Easley (1978), ceci peut se produire lorsqu'il y a une inadéquation entre les exigences conceptuelles d'un contenu enseigné et le degré de compétence de raisonnement des élèves à qui ce contenu est enseigné. Le raisonnement exercé s'appuie sur des relations incorrectes entre des idées pourtant exactes. En effet, les concepts appropriés sont invoqués pour construire la réponse, mais la façon dont ils sont mis en relation les uns avec les autres mène à la mauvaise réponse, qui peut alors sembler illogique : en effet, les concepts évoqués dans l'explication sont justes, mais pas la conclusion à laquelle ils mènent. C'est pourquoi ce cas est nommé ici l'agencement incorrect (de concepts par ailleurs corrects).

Ces quatre schémas représentent les cas de figure les plus polarisés, mais il demeure possible que certains étudiants répondent incorrectement à une question à la fois parce qu'ils ont des conceptions alternatives, qu'ils raisonnent incorrectement et qu'il leur manque une partie des concepts nécessaires, par exemple. Ces cas plus complexes pourront être rappelés plus tard, mais ces quatre schémas principaux seront désormais utilisés plus particulièrement, comme une loupe pour explorer les recherches sur les raisonnements en sciences.

2.5.1 Obstacles à l'apprentissage : en sciences, en chimie

Les schémas des *modèles mentaux* → *réponse* supposent que les étudiants ont des obstacles qui les conduisent à donner de mauvaises réponses. Différentes typologies d'obstacles existent dans les écrits en éducation, voici les deux typologies sur lesquelles sont d'abord basés les schémas des *modèles mentaux* → *réponse*.

Le philosophe Gaston Bachelard a proposé dans son ouvrage *La formation de l'esprit scientifique* (1938, éd. 2004) une catégorisation des obstacles à l'apprentissage des sciences : les obstacles peuvent être ontogéniques, épistémologiques et didactiques. Les obstacles ontogéniques sont attribuables au niveau de développement cognitif des étudiants. Les obstacles épistémologiques trouvent leur source dans la nature même des concepts scientifiques, et s'observent aussi dans l'histoire de ces concepts. Enfin, les obstacles didactiques qui entravent l'apprentissage trouvent leur source dans l'enseignement lui-même.

Keith S. Taber (2001b) propose quant à lui une typologie des obstacles à l'apprentissage de la chimie à quatre volets : les obstacles de carence, les obstacles de fragmentation, les obstacles ontologiques et les obstacles pédagogiques. Alors que les obstacles des deux premières catégories impliquent une lacune ou un manque d'organisation dans les connaissances des étudiants, ceux des deux dernières peuvent être plus problématiques. Les obstacles ontologiques surgissent en effet lorsque le matériel présenté est incompatible avec les idées d'un étudiant sur sa façon de voir le monde. Les obstacles pédagogiques³, quant à eux, sont nommés ainsi parce qu'ils surgissent lorsque le matériel présenté aux étudiants est incompatible avec ce qui lui a déjà été enseigné. Les obstacles ontologiques et pédagogiques sont tous deux reliés aux conceptions alternatives. Les obstacles pédagogiques trouvent leur origine dans l'enseignement comme tel, tout comme les obstacles didactiques (selon la typologie de Bachelard).

Les schémas du processus menant des modèles mentaux à la réponse, proposés dans cette thèse et présentés à la figure 3, intègrent les obstacles de la façon suivante :

³ Il est à noter que le terme *pedagogic* utilisé par Taber a été traduit par « pédagogique »; toutefois, à la lumière de sa définition, une traduction plus adéquate de ce que Taber nomme *pedagogic impediment* serait peut-être « obstacle didactique », au sens où l'entend Bachelard.

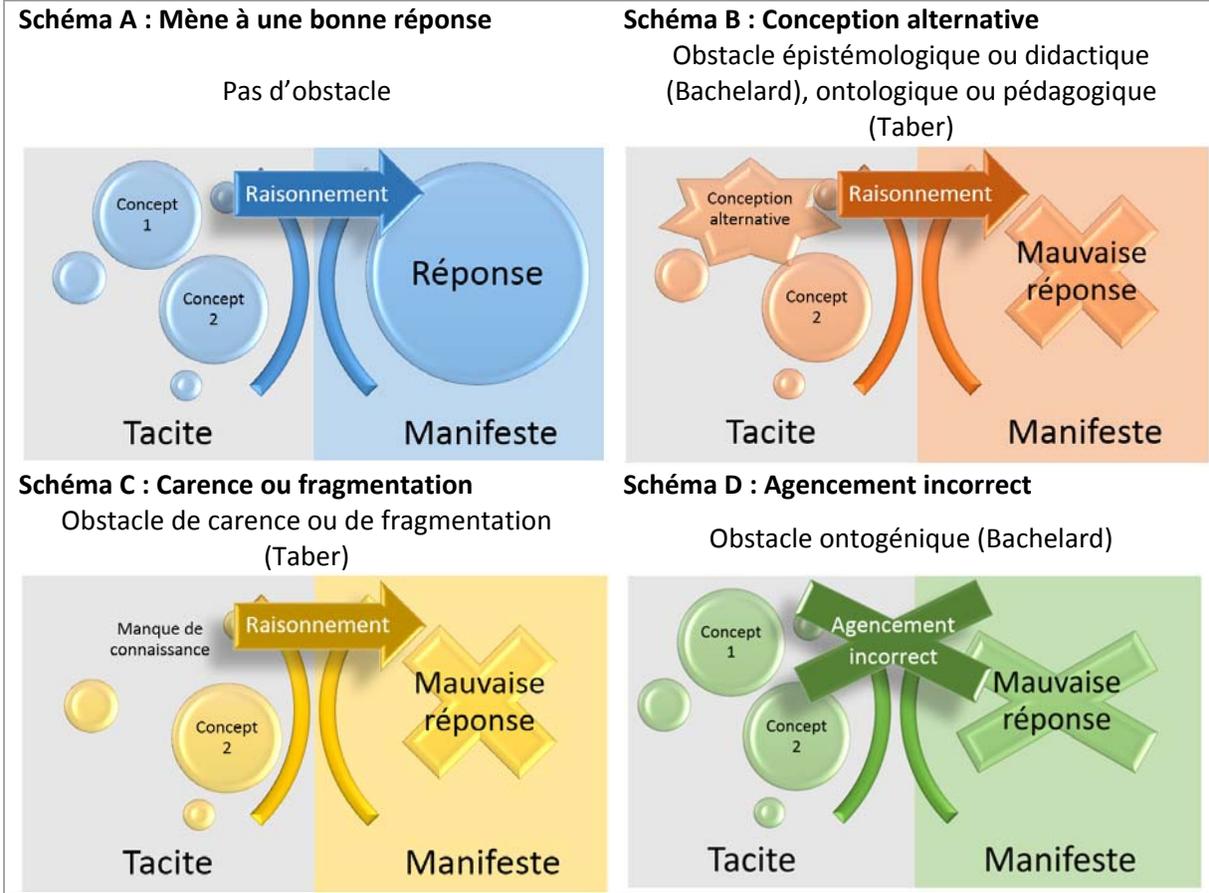


Figure 4 : Obstacles associés aux quatre schémas du processus *modèles mentaux* → *réponses*

Les obstacles ne doivent pas être considérés comme des blocages insurmontables, mais plutôt des objectifs vers lesquels devrait tendre la situation didactique. Ainsi, on parle « d'objectif-obstacle » pour signifier l'action dynamique qui devrait émerger des obstacles (Astolfi et coll., 2008). Comme l'apprentissage passe par le triomphe sur les obstacles, les objectifs de l'enseignement devraient être ces obstacles. Mais il faut d'abord connaître les obstacles de nos étudiants : « pour organiser des situations d'apprentissage visant le franchissement d'un obstacle, il faut d'abord diagnostiquer un obstacle qui apparait infranchissable, au niveau et au moment considérés » (Astolfi et coll., 2008, p. 126). Connaître dans quel schémas des *modèles mentaux* → *réponse* se situe un étudiant qui donne une mauvaise réponse serait un premier pas vers une séquence didactique visant à surmonter l'obstacle.

2.5.2 Quatre types de raisonnement en chimie

Un certain consensus parmi les chercheurs tend à montrer qu'il existe quatre types principaux de raisonnement utilisés lors de résolution de tâches en chimie : le raisonnement basé sur les règles (*rules-based reasoning*), le raisonnement basé sur l'expérience de cas (*case-based reasoning*), le raisonnement basé sur l'application de modèles (*model-based reasoning*) et le raisonnement basé sur les symboles (*symbol-based reasoning*) (Christian & Talanquer, 2012; Ferguson & Bodner, 2008; Kraft, Strickland, & Bhattacharyya, 2010). Ces quatre types de raisonnement, de même que les parallèles à établir entre ceux-ci et les quatre schémas des processus menant à une réponse manifeste, présentés à la figure 3, seront détaillés ici.

2.5.2.1 Raisonnement basé sur les règles

Un raisonnement basé sur les règles implique un raisonnement principalement déductif, qui utilise à la suite un ensemble de règles correspondant chacune à une petite portion de connaissance. Pour faire un parallèle avec le cadre théorique de l'heuristique, le raisonnement basé sur les règles utilise plutôt un ensemble de connaissances squelettiques intuitives, et peu de raisonnement en raccourci. Ce raisonnement est plutôt fastidieux, puisque pour atteindre la bonne réponse, chaque règle doit être utilisée, l'une après l'autre. Toutefois, lorsqu'appliqué correctement, c'est un mode de raisonnement valide, menant à la bonne réponse, qui se placerait au **schéma A** du processus *modèles mentaux* → *réponse*, qui a été présenté précédemment. Malheureusement, c'est un raisonnement qui mène souvent à des erreurs systématiques, lorsqu'il est appliqué sans considération dans des situations où il ne s'applique pas. Par exemple, la prédiction de la structure d'une molécule qui utiliserait un raisonnement basé sur les règles invoquerait successivement toute une série de règles : l'atome le moins électronégatif doit être au centre, à moins que ce soit l'hydrogène; tous les atomes doivent être reliés entre eux par un partage d'un, deux ou trois doublets; les atomes doivent le plus possible respecter leur valence, sinon ils ont des charges formelles; les atomes de la deuxième période ne doivent pas dépasser l'octet, mais ils peuvent arriver sous l'octet; etc. C'est une procédure fastidieuse, où chaque étape mal réalisée ou oubliée mène à une mauvaise réponse, selon le **schéma C**, ou qui ouvre la porte à la présence de représentations, comme au **schéma B** du processus *modèles mentaux* → *réponse*.

2.5.2.2 Raisonnement basé sur l'expérience de cas

Le raisonnement basé sur l'expérience de cas est plutôt à l'opposé : il est appliqué lorsque des caractéristiques familières à la tâche sont reconnues par la personne qui fait le raisonnement. Ceci peut vouloir dire d'adapter d'anciennes solutions à de nouveaux problèmes ou d'utiliser des expériences passées pour créer ou analyser une solution à un nouveau problème (Christian & Talanquer, 2012). C'est un raisonnement plutôt inductif, plus rapide que le raisonnement basé sur les règles, mais aussi plus prompt à générer des réponses incorrectes. En effet, les caractéristiques familières peuvent être trompeuses, et on peut choisir de répondre à une tâche à la lumière de caractéristiques accidentelles non pertinentes. De nombreux experts raisonnent ainsi, étant donné leur familiarité avec un très grand nombre de cas. L'heuristique qu'ils appliquent alors se base sur un raisonnement en raccourci et génère plus souvent des réponses correctes, ce qui peut porter les novices qui les observent à tenter un tel type de raisonnement, entreprise séduisante, mais périlleuse lorsque l'expérience est insuffisante. La casuistique chimique demeure pourtant un outil essentiel au raisonnement du chimiste expert, car elle permet de s'appuyer sur un ensemble restreint de cas paradigmatiques pour choisir des voies de synthèse ou des méthodes d'analyse en laboratoire (Christian & Talanquer, 2012).

On peut illustrer le raisonnement basé sur l'expérience de cas par la situation suivante : un étudiant qui isole un composé dans le laboratoire de chimie organique se demande quelle phase, celle du dessus ou celle du dessous, dans son ampoule à décanter, est la phase organique de son extraction liquide-liquide. S'il s'appuie sur l'expérience de cas, il pourra se dire : « c'est la troisième fois que je fais des extractions liquide-liquide, et la phase organique a toujours été celle du haut. Ce doit être celle du haut cette fois-ci aussi. » Le risque est grand, et un chimiste s'en sera rendu compte : plusieurs solvants organiques sont plus denses que l'eau, et c'est sur la densité relative à l'eau que cet étudiant aurait dû baser son jugement, et non sur son expérience, qui était incomplète. Ce raisonnement mènerait à une mauvaise réponse comme représenté dans le **schéma C** du processus *modèles mentaux* → *réponse*, le manque de connaissance constituant le plus grand péril à utiliser le raisonnement basé sur l'expérience.

2.5.2.3 Raisonnement basé sur les modèles

Le raisonnement basé sur les modèles est le plus commun et le plus apprécié en sciences et en particulier en chimie (Christian & Talanquer, 2012), puisqu'il se base à la fois sur des

connaissances détaillées permettant d'expliquer les phénomènes et un raisonnement en raccourci permettant de les prédire. En chimie, ces modèles sont nombreux et ont des caractéristiques variées : le domaine du savoir en chimie (macroscopique, sous-microscopique ou symbolique), les dimensions (structure, temps, énergie), l'approche (par exemple, conceptuelle ou plus mathématisée), etc. Bien entendu, le piège réside encore une fois dans le manque de connaissances suffisantes (comme au **schéma C**), ou encore dans la présence de conceptions alternatives teintant cette base de connaissance (comme au **schéma B**). Souvent, les étudiants qui emploient le raisonnement basé sur les modèles tendent à employer une sorte d'hybride, mêlant des idées scientifiquement correctes à des conceptions alternatives (Vosniadou, 1994). Par exemple, le modèle permettant de prédire l'état à température de la pièce d'un composé met en scène la grosseur des molécules, leur polarité, le type de liaisons intermoléculaires qu'elles peuvent faire. Le raisonnement basé sur les modèles, employé par un expert, ne nécessite pas d'appliquer successivement toutes les étapes du raisonnement par les règles ni n'impose d'avoir l'expérience de tous les composés. Un expert peut juger qu'un composé ayant la formule moléculaire $C_{27}H_{46}O$ sera très certainement solide à température de la pièce : c'est une grosse molécule, elle fait peut-être même des ponts H. Ce raisonnement en est un basé sur les modèles.

2.5.2.4 Raisonnement basé sur les symboles

Le raisonnement basé sur les symboles s'exprime quant à lui quand les étudiants se fient aux caractéristiques symboliques des éléments de la tâche à accomplir (Christian & Talanquer, 2012). C'est une stratégie basée sur la manipulation du symbolisme chimique dans une approche simpliste, particulièrement utilisée par les étudiants qui ne comprennent pas la raison des processus chimiques, mais qui se fient uniquement aux caractéristiques symboliques de surface des problèmes à résoudre. Ce mode de raisonnement est peu efficace et témoigne de peu d'intégration des contenus. Ce raisonnement qui mène à la mauvaise réponse est une autre occurrence du **schéma C** du processus *modèles mentaux* → *réponse*. Il ne faut pas le confondre avec le mode de raisonnement basé sur les modèles, lorsque les modèles sont eux-mêmes formalisés de façon symbolique. En effet, un raisonnement qui emploie en réalité les modèles peut s'appuyer sur des symboles (pour représenter une idée, mettre en relation des concepts, etc.) sans que les symboles soient eux-mêmes la base du raisonnement. Un exemple de tel

raisonnement qui mènerait à la mauvaise réponse pourrait être que le SO_2 est une molécule linéaire, parce que le CO_2 est linéaire et que leurs structures sont semblables, deux liaisons doubles avec les oxygènes dans les deux cas. Bien sûr, cette conclusion néglige le fait, particulièrement important, que l'atome de soufre a une valence de six, ce qui laisse un doublet libre sur le soufre dans le SO_2 , qui a donc une forme coudée et non pas linéaire comme le CO_2 . Ces indices de surface ne permettent généralement pas de trouver la bonne réponse et témoignent de lacunes importantes de la part des étudiants qui doivent y recourir, correspondant en effet au **schéma C**.

Dans une étude où ce cadre théorique a été utilisé comme lunette pour sonder les difficultés de raisonnement d'étudiants universitaires en chimie, Kraft et ses collaborateurs (Kraft et coll., 2010) ont noté que la plupart des bonnes réponses proviennent d'étudiants utilisant le mode de raisonnement basé sur les modèles, avec une nuance toutefois : plusieurs étudiants ne parviennent pas à dessiner le bon mécanisme réactionnel s'ils s'appuient sur le modèle de la substitution nucléophile (le bon modèle à utiliser pour résoudre la tâche, en l'occurrence) s'ils ont des difficultés conceptuelles avec des éléments du modèle.

Autrement dit, les conceptions alternatives peuvent nuire à un raisonnement qui serait, en lui-même, convenable à utiliser dans les circonstances. Cette perspective de la relation entre raisonnement et conceptions alternative est en accord avec le **schéma B** du processus *modèles mentaux* → *réponse* présenté plus haut. Dans ce cas, ce ne serait pas tant le raisonnement que les conceptions alternatives qui seraient à l'origine de la mauvaise réponse manifeste à une question.

Christian et Talanquer (2012) ont réalisé des observations semblables, toujours chez des étudiants universitaires en chimie, soit que les raisonnements les plus efficaces s'appuient souvent sur les modèles, et non sur les règles, l'expérience de cas ou les symboles. Lors de discussions de groupes d'étude en chimie organique, ces chercheurs ont noté que les étudiants qui raisonnent en s'appuyant sur les symboles ou l'expérience de cas tentent, souvent sans succès, de réappliquer directement ce qui a été vu en classe au nouveau problème à traiter, même si ça ne s'applique pas dans ce contexte. En se fiant aux caractéristiques symboliques ou à un exemple étudié en classe, ces étudiants tentent de contourner la nécessité de comprendre la raison du phénomène. Les étudiants qui raisonnent en s'appuyant sur les règles, quant à eux, raisonnent surtout autour de l'applicabilité ou de la non-applicabilité de la règle à la situation

présentée, et résolvent ensuite la tâche, avec plus ou moins de succès selon qu'ils ont ou non la bonne règle à appliquer dans les circonstances. Ces deux exemples correspondent au **schéma D**, qui représente la situation dans laquelle c'est le raisonnement, et non les conceptions alternatives, qui mène à une mauvaise réponse manifeste.

À l'opposé, les étudiants qui raisonnent en s'appuyant sur les modèles verbalisent les raisons qui sous-tendent les phénomènes et parviennent à les expliquer aux autres. Ils ont aussi plus de succès à résoudre les tâches qui leur sont présentées. Leur situation est représentée par le **schéma A** du processus *modèles mentaux* → *réponse*.

2.5.3 Autre façon de concevoir le raisonnement : les heuristiques

Un champ de recherche a avancé que l'esprit humain fonctionne sur la base d'un nombre assez restreint de contraintes cognitives qui servent, dans différents contextes, à résoudre des problèmes, à prendre des décisions ou à porter un jugement sur l'amplitude d'un phénomène par rapport à un autre (Gigerenzer & Goldstein, 1999). Il s'agit du champ de recherche sur les heuristiques.

Dans la vie de tous les jours, les gens prennent des décisions en se basant sur des processus simples à appliquer. Rares sont les occasions où ils considèrent tous les paramètres d'un problème avant de trancher. En effet, certaines contraintes, reliées à leurs habitudes, à leur personnalité, à la familiarité de la situation ou à d'autres préférences les poussent à faire un choix qui semble tomber sous le sens, du moins pour eux.

Ces préférences, habitudes et modes de pensées sont constitués en heuristiques, c'est-à-dire en contraintes cognitives qui permettent de juger et de générer des réponses acceptables sans prendre le temps et l'énergie de faire un raisonnement complet. C'est pourquoi les gens utilisent régulièrement les heuristiques, qui ne nécessitent l'emploi que d'une partie de l'information disponible.

En somme, le raisonnement dit « par heuristiques » est contraint d'une part par ce savoir intuitif squelettique et d'autre part par des procédures de raisonnement par raccourci. La combinaison de ces deux éléments permet de générer des réponses acceptables en fournissant peu d'effort, mais elle mène parfois à des erreurs systématiques graves.

Pour tracer un parallèle entre le raisonnement par heuristiques et les modèles présentés plus tôt à la figure 3, on peut avancer que le raisonnement par heuristiques peut se retrouver au

schéma B ou au **schéma D** du processus *modèles mentaux* → *réponse*. En effet, soit les connaissances squelettiques ne sont pas adéquates par rapport à la théorie acceptée (schéma B), soit les procédures de raisonnement par raccourci mènent à des agencements incorrects de concepts, laissant paraître une réponse qui semble illogique (schéma D).

L'emploi d'une heuristique pour agencer des idées correctes dans un raisonnement incorrect, comme au schéma D, a une certaine parenté avec le modèle des *p*-prims de diSessa (1993). Cette parenté, de même que les heuristiques et les autres contraintes cognitives pertinentes relevées dans les écrits de recherche seront présentées dans les sections qui suivent.

2.5.3.1 Le raisonnement par heuristique en chimie

Les chimistes qui choisissent un solvant approprié pour une réaction ne raisonnent pas en considérant tous les paramètres : ils choisissent les paramètres les plus importants et basent leur jugement sur les valeurs attribuées à ces paramètres. Cette façon de procéder a une valeur ajoutée sur le raisonnement algorithmique complet, parce qu'elle est plus rapide et donne habituellement un résultat acceptable. Ils appuient leur raisonnement sur l'expérience de cas, et c'est pour cette raison que c'est une heuristique : elle permet de faire un plus petit effort cognitif tout en donnant un résultat acceptable. Comme pour le raisonnement avec les *p*-prims de diSessa, les experts utilisent aussi les heuristiques, mais ils arrivent à les utiliser pour produire un raisonnement exact. L'expertise, dans ce cas, ne veut donc pas dire la substitution des heuristiques par un raisonnement analytique plus complet, mais plutôt l'habileté de choisir les bons indices pour poser un jugement et prendre une décision dans un contexte précis (Maeyer & Talanquer, 2010).

À partir des théories cognitives dont l'heuristique fait partie, un groupe de chercheurs (Maeyer & Talanquer, 2010; McClary & Talanquer, 2011; Talanquer, 2006, 2009) a proposé une relecture des résultats de recherche sur les conceptions alternatives en chimie à la lumière des types de raisonnement qui, au-delà de la conception elle-même, peuvent mener les étudiants à faire des prédictions inexacts en chimie.

Talanquer (2006) a ainsi compilé les conceptions alternatives relevées chez des élèves du secondaire et des étudiants postsecondaires que plusieurs articles de recherche et monographies ont mentionnées au fil des années. Il a analysé ces conceptions alternatives au regard du type de raisonnement auquel les étudiants ont probablement eu recours pour arriver à

une telle « fausse conclusion ». Il s'agit en effet d'une analyse de cause *probable*, car on ne pouvait pas interroger spécifiquement les étudiants sur leur raisonnement, étant donné que la recherche se basait sur des résultats publiés antérieurement. L'expertise des chercheurs leur a malgré tout permis de dégager le raisonnement qui selon toute vraisemblance menait les étudiants à donner une réponse ensuite associée à une conception alternative.

L'analyse de Talanquer a permis de concevoir un cadre explicatif de sens commun (*commonsense explanatory framework*) qui classe les conceptions alternatives en chimie en deux grands types : celles qui reposent sur des suppositions empiriques de base (*basic empirical assumptions*) et celles qui découlent d'heuristiques en bonne et due forme. La distinction entre ces deux types est subtile, mais importante.

Les suppositions empiriques de base des étudiants sont des croyances fondamentales qui ne se basent pas nécessairement sur des connaissances déclaratives apprises en chimie, qui transcendent les domaines et sont assez squelettiques en essence. Elles sous-tendent les conceptions alternatives. Les cinq suppositions empiriques de base déterminées par Talanquer sont la continuité (la matière est continue, lorsqu'on la divise les parties ont les mêmes propriétés que la substance), le substantialisme (des concepts abstraits ont des propriétés matérielles), l'essentialisme (les substances ont une essence inhérente qui reste inchangée dans une réaction chimique, mais qui change dans un changement de phase), la causalité mécanique (un agent externe induit le changement) et la téléologie (les changements qui n'ont pas d'agent externe manifeste se produisent pour satisfaire un but).

Les suppositions empiriques de base sont épistémologiquement proches des *p-prims*, avec lesquelles elles partagent plusieurs caractéristiques : elles sont issues d'une interprétation superficielle de la réalité, elles servent souvent de base au raisonnement, elles sont auto-explicatives, et ceux qui les emploient ne ressentent pas le besoin de les justifier (diSessa, 1993). Toutefois, pour Talanquer, les suppositions empiriques de base ne sont pas des *p-prims*. Il spécifie plutôt que les termes *p-prims*, *implicit presuppositions*, *core hypothesis*, *background assumptions*, *core intuitions* ou *conceptual resources* sont utilisés comme des quasi-synonymes dans plusieurs recherches (Talanquer, 2009).

Les heuristiques représentent le deuxième grand type d'éléments du cadre explicatif de sens commun. Talanquer a déterminé onze heuristiques sous-jacentes aux conceptions

alternatives, qu'il regroupe en quatre catégories : les heuristiques d'association, de réduction, de fixation et de séquence linéaire, présentées dans le tableau qui suit.

Tableau I : Heuristiques contraignant le raisonnement en chimie

Catégories	Heuristiques	Définition de l'heuristique
Association	Covariance	Plus la cause est grande, forte, proche ou longue, plus l'effet est grand.
	Similarité	La cause et l'effet dans une relation causale partagent des caractéristiques similaires.
	Proximité	Il doit y avoir un contact physique entre des agents pour faire effet.
	Additivité	Les effets sont toujours linéairement additifs et également divisés dans un système.
	Disponibilité	Tendance à choisir des causes parmi les concepts qu'on connaît davantage ou parmi ceux qui viennent le plus rapidement à l'esprit.
Réduction	<i>One-reason decision-making</i>	Les propriétés d'un système sont imputables à une seule variable.
	Non-différenciation	Des variables importantes ou des conditions d'une définition sont négligées.
Fixation	Généralisation abusive	Appliquer des principes généraux et lois à des contextes où ils ne s'appliquent pas.
	Détermination mentale	Réemploi d'une méthode de résolution de problème qu'on vient d'utiliser, mais qui ne s'applique pas.
	Fixité fonctionnelle	Penser que les modèles et les symboles ont une interprétation unique et bien définie.
Séquence linéaire		Analyser un processus comme une histoire linéaire et séquencée.

Talanquer illustre chaque heuristique, dont voici quelques exemples. L'heuristique d'association nommée « similarité » contraint le jugement lorsqu'un individu croit que plus un ion est positif, plus il est gros, alors que c'est l'inverse. L'heuristique de la non-différenciation se manifeste lorsqu'on croit que l'électronégativité est une mesure de la polarité, alors que ce sont deux concepts reliés, mais pas équivalents. Lorsqu'un étudiant se représente tous les composés comme étant des molécules, on voit à l'œuvre l'heuristique de la généralisation abusive. Un exemple de fixité fonctionnelle est la croyance que les molécules ont la forme de leur structure de Lewis. De même, la séquence linéaire s'exprime lorsqu'on décrit la réaction à l'équilibre chronologiquement : d'abord la réaction directe, suivie de la réaction inverse, alors

que l'état d'équilibre existe lorsque la réaction directe et la réaction inverse se déroulent simultanément et à la même vitesse.

On voit que plusieurs de ces raisonnements sont en réalité nécessairement basés sur des conceptions alternatives : par exemple, croire que l'électronégativité est une mesure de polarité n'est pas surtout un mauvais raisonnement, c'est surtout une représentation de l'électronégativité en désaccord avec la théorie scientifiquement acceptée. Ainsi, le modèle du raisonnement de sens commun proposé par Talanquer n'est pas exclusivement une liste de modes de raisonnements incorrects; c'est surtout une classification des conceptions alternatives basée sur les ressemblances de processus entre les raisonnements qui leur permettent de s'exprimer lorsqu'une réponse est sollicitée. Le modèle de Talanquer demeure pertinent pour envisager les conceptions alternatives, mais il ne faut pas le comprendre comme une banque de modes de raisonnements extérieurs à la chimie. Ce sont bien les raisonnements reliés aux conceptions alternatives fréquentes répertoriées dans les écrits de recherche.

À la suite de l'inventaire qui lui a permis de développer ce modèle, Talanquer conclut que pour favoriser le changement conceptuel, il est important de prendre en considération le raisonnement, pas seulement les conceptions alternatives elles-mêmes. On ne peut se contenter d'enseigner les bonnes conceptions, il faut aussi enseigner la façon correcte de réfléchir pour faire des prédictions justes. On doit rendre explicites pour les étudiants les relations entre les concepts et enseigner systématiquement la façon correcte d'agencer les concepts avec logique.

Il semble par contre que, malgré l'apparente fécondité de l'hypothèse de Talanquer, certaines de ses affirmations ne soient pas partagées par tous les chercheurs dans le domaine. Talanquer propose son modèle du raisonnement de sens commun en chimie comme un modèle de raisonnement naïf. Or, plusieurs conceptions alternatives proviennent en effet d'un raisonnement naïf, mais probablement pas toutes. Selon Keith Taber (2001a), comme mentionné précédemment, l'enseignement qu'ont reçu les étudiants est souvent responsable de leurs conceptions alternatives, en chimie en particulier. Leurs erreurs de raisonnement sont des erreurs de raisonnement « éduquées », qu'un débutant ne pourra pas avoir spontanément, sans avoir reçu le moindre enseignement sur le sujet.

En effet, à la différence des conceptions alternatives qualifiées de naïves qu'on peut observer chez les élèves plus jeunes, les étudiants postsecondaires, mais aussi les élèves du secondaire ont des conceptions alternatives en chimie qui trouvent pour la plupart leur origine

dans l'enseignement antérieur (Taber, 2001a). Il serait donc pertinent d'élargir le cadre de Talanquer pour y inclure les modes de raisonnement moins naïfs.

Sur une question connexe, dans une série d'entrevues avec 19 étudiants universitaires inscrits en chimie organique, Maeyer et Talanquer (2010) ont tenté de mettre en lumière les suppositions implicites de base de ces derniers à propos des acides et des bases. Ils présentaient une série de composés chimiques aux étudiants, qui devaient prédire lequel était le plus acide. Leurs observations ont montré que les étudiants utilisaient une combinaison de modèles mentaux pour faire leur prédiction, ce qui les amenait à considérer plusieurs facteurs non pertinents au problème proposé. Les étudiants peinaient à choisir les bons facteurs à invoquer. Leurs modèles mentaux n'étaient pas non plus cohérents d'une tâche à l'autre : les chercheurs ont observé que le contenu à l'étude et le type de tâche influençaient les facteurs utilisés, ce qui pointe vers une certaine plasticité des systèmes de raisonnement.

Les étudiants tendaient à employer des heuristiques pour accélérer leur prise de décision, au détriment de l'exactitude de la réponse. Souvent, les étudiants se fiaient aux similarités et différences explicites (par exemple, le nombre d'atomes hydrogène dans le composé) plutôt qu'aux caractéristiques implicites (par exemple, le type, ionique ou moléculaire, du composé), ce qui aurait nécessité plus d'énergie cognitive.

Cette situation semble s'approcher du modèle présenté à la figure 3 dans lequel la mauvaise réponse est attribuable à un manque d'organisation des connaissances. En effet, ne pas pouvoir utiliser la bonne connaissance et utiliser des idées et concepts non reliés au problème correspond à l'obstacle de fragmentation décrit par Taber (2001b), soit le processus par lequel les étudiants répondent incorrectement à une question parce qu'ils ne peuvent pas invoquer les bonnes idées ou les bons concepts.

2.5.3.2 Parenté entre les heuristiques et le modèle des *p-prims*

Selon le chercheur américain Andrea diSessa, le raisonnement des étudiants sur les idées en physique se baserait sur un certain savoir intuitif plutôt fragmentaire, constitué d'une collection d'idées phénoménologiques plus ou moins structurées. On appelle ces contraintes cognitives des primitives phénoménologiques, ou *p-prims* (diSessa, 1993). Ces *p-prims* sont utilisées dans les faits tant par les novices que par les experts. Les experts sont habiles à agencer les *p-prims* de façon à interpréter correctement les phénomènes. Les novices, eux, agencent les

p-prims incorrectement ou les invoquent dans des situations où elles ne s'appliquent pas. DiSessa ajoute que les novices les invoquent aussi au terme d'un raisonnement sur un phénomène physique, quand ils arrivent au bout des ressources fournies par les modèles qu'ils comprennent et que, ne pouvant pas aller plus loin, ils se contentent de conclure que tel phénomène se produit « parce que les choses sont ainsi ».

À la lumière de ces explications, on peut placer l'utilisation de *p-prims* menant à une bonne réponse au **schéma A** du processus *modèles mentaux* → *réponse*, et celle menant à une mauvaise réponse, au **schéma D**, si c'est l'agencement des concepts qui est incorrect, ou au **schéma C**, si c'est la difficulté d'invoquer la bonne *p-prim* qui pose problème. On se trouverait de plus dans ce dernier cas devant un obstacle de fragmentation (Taber, 2001b).

Comme on l'a dit, l'application d'une heuristique pour prendre une décision ou poser un jugement emploie deux éléments : des connaissances squelettiques intuitives et un raisonnement en raccourci. Les connaissances squelettiques intuitives peuvent être des *p-prims*, et le raisonnement en raccourci peut faire intervenir des erreurs logiques. Ainsi, le raisonnement par heuristique, bien que frugal et économique pour un expert, peut mener à des erreurs pour un novice.

2.5.3.3 *P-prims* en chimie

Une seule étude a cherché à déterminer la présence de *p-prims* dans le raisonnement en chimie (García Franco et Taber, 2009). C'est peu, mais compréhensible, car c'est autour de l'apprentissage de la physique qu'on a développé ce construit (diSessa, 1993). Les conclusions de García Franco et Taber restent donc à l'état d'hypothèses, mais ces hypothèses sont pertinentes pour la présente recherche et s'inscrivent dans le même champ conceptuel.

Dans cette étude, les chercheurs voulaient au départ appréhender la façon dont les étudiants utilisent le sous-microscopique pour expliquer le macroscopique, une tâche dont il a été question précédemment et qu'on a déterminée comme l'une des plus difficiles dans l'apprentissage de la chimie au niveau postsecondaire (Taber, 2001a). García Franco et Taber (2009) ont réalisé une cinquantaine d'entrevues avec des élèves du secondaire en Grande-Bretagne, à qui ils ont demandé d'expliquer différents phénomènes dont ils faisaient la démonstration, comme la mise en solution de sels, l'évaporation de l'eau, la compression d'un

gaz, etc. Leur objectif était de voir l'étendue et la justesse des explications des élèves quant à ces phénomènes qui se déroulaient devant eux, à l'échelle observable (donc macroscopique), explications qui auraient dû mettre en jeu des concepts sous-microscopiques (comme la séparation des ions dans un solvant ou l'augmentation de la vitesse relative des particules qui s'évaporent).

Leur principale conclusion : en majorité, les étudiants n'invoquent pas le domaine sous-microscopique pour expliquer les observations macroscopiques. Seule une minorité des élèves interviewés démontraient une compréhension de l'idée des particules comme construits explicatifs. Comme d'autres études présentent aussi cette même conclusion (Ayas et coll., 2010; Hesse & Anderson, 1992), les chercheurs n'ont pas été étonnés, mais l'ampleur du problème était plus importante que ce à quoi ils s'attendaient.

Les étudiants plus vieux, au postsecondaire, arrivent au collège et apprennent des modèles plus complexes de la nature corpusculaire, mais leur apprentissage ne s'effectue généralement pas correctement d'un point de vue conceptuel étant donné qu'il s'appuie sur leur incompréhension des idées corpusculaires de base vues au secondaire.

La recommandation implicite que García Franco et Taber (2009) font pour l'enseignement constitue l'une des principales motivations à la présente recherche :

Whilst there is much emphasis on where students go wrong, characterised as their 'misconceptions', and the importance of taking these ideas into account, there is limited engagement in ideas from research about the nature and origins of learners' ideas. Recommending that teachers develop activities to overcome learners' misconceptions, without understanding how and why students come to think in the ways they do, offers teachers a very limited basis for planning teaching that can support conceptual change. (p. 1946)

De plus, ils ont, de façon très innovante, proposé comme hypothèse quelques *p-prims* qui semblent contraindre le raisonnement des étudiants qui n'invoquent pas les particules sous-microscopiques pour expliquer les phénomènes macroscopiques, ou les invoquent incorrectement. Ces idées semblent être des façons intuitives de réfléchir à propos de phénomènes et ainsi, se classent parmi les *p-prims* telles que définies par diSessa (1993). Parmi les *p-prims* que proposent García Franco et Taber, on retrouve « le composé donne la propriété », « les changements nécessitent un agent », « il y a un partenaire actif », « les substances réagissent

(naturellement) » et « les choses ont une configuration (naturelle) prédéterminée ». Ces règles intuitives portent à la fois sur les mécanismes et sur la nature même du monde naturel.

À titre d'exemple, voici l'illustration de la *p-prim* « les changements nécessitent un agent ». On utilise cette *p-prim* dans le raisonnement suivant : « La feuille est sur mon bureau, elle est immobile. Sans que personne n'y touche, elle tombe par terre. Il y a certainement un agent qui a causé ce changement, il y a peut-être eu un coup de vent ». C'est un raisonnement qui est tout à fait logique et exact, mais l'emploi de cette *p-prim* mène parfois les étudiants à raisonner incorrectement en chimie. Par exemple, deux liquides solubles l'un dans l'autre se mélangent sans présence d'agent, mais cela aboutit en un changement. Les étudiants peuvent être perplexes et tenter de postuler qu'il existe un agent, nécessaire selon eux à ce changement. Ils pourraient invoquer qu'il faut agiter ou chauffer les liquides pour qu'ils se mélangent. Or, ces agents ne sont pas nécessaires, puisque comme les particules sont en mouvement constant, elles finissent par se mélanger « toutes seules » (sans agent).

Cette *p-prim* et les autres proposées par Taber et García Franco (2010) s'expriment dans le raisonnement de nombreux étudiants, sans corrélation significative avec leur niveau scolaire.

À la suite de leurs observations, García Franco et Taber (2009) recommandent de s'attarder à déterminer l'origine des conceptions alternatives. Si on guidait l'apprentissage des multiples modèles de la chimie en rattachant ceux-ci aux idées intuitives de base qu'ont les étudiants à propos du monde, on pourrait développer l'enseignement de façon à accélérer cet apprentissage (García Franco et Taber, 2009).

2.5.3.4 Autres contraintes : fixité fonctionnelle et réduction fonctionnelle

Un autre groupe de recherche, celui de Furió et Calatayud (Furió & Calatayud, 1996; Furió et coll., 2000) a proposé d'étudier les difficultés des étudiants de chimie sous l'angle de deux biais cognitifs qui pourraient expliquer ces difficultés, soit la fixité fonctionnelle et la réduction fonctionnelle. Leur compréhension de la fixité fonctionnelle est cohérente avec celle de l'équipe de Talanquer, présentée plus haut.

La fixité fonctionnelle se manifeste lorsque les étudiants s'appuient sur un apprentissage par cœur ou l'application sans réfléchir d'une procédure pour arriver à une réponse. Il arrive que cette stratégie soit efficace en ce sens qu'elle mène à la bonne réponse, mais elle constitue une béquille qui nuit aux étudiants pour trouver des solutions à des problèmes qui sortent de ceux

auxquels ils sont habitués de répondre. Ce biais contraint la pensée créative et empêche de trouver de nouvelles solutions aux problèmes. Un exemple de fixité fonctionnelle observé par Furió et ses collaboratrices (2000) est lorsque les étudiants invoquaient le principe de Le Chatelier pour prédire le sens du déplacement de l'équilibre d'une réaction en phases mixtes, lorsqu'un solide était ajouté au système. Les étudiants reconnaissaient qu'il s'agissait d'un problème d'équilibre et cette reconnaissance rapide les empêchait de réfléchir sur l'impact de l'ajout d'un solide au système – alors que cet ajout n'a pas d'impact, car l'équilibre concerne uniquement la phase gazeuse du système hétérogène. L'application d'une procédure menait ainsi les étudiants à une mauvaise réponse. Il s'agit d'une instance du raisonnement basé sur les règles et s'inscrit dans le **schéma C** du processus *modèles mentaux* → *réponse*, plus précisément du côté de la fragmentation des connaissances (qui sont probablement là, mais pas invoquées alors qu'elles étaient nécessaires).

La réduction fonctionnelle, quant à elle proposée au départ par Viennot (1992) est une forme de contrainte cognitive dans laquelle la dépendance fonctionnelle de tous les paramètres d'un problème n'est pas prise en compte. Lorsque plusieurs grandeurs physiques sont mises en scène dans un problème et qu'il faut multiplier ou diviser les unes par les autres pour trouver la réponse, la dépendance fonctionnelle entre ces grandeurs physiques rend les réponses incorrectes impossibles d'un point de vue logique. Si on veut par exemple calculer la pression finale dans un système fermé qu'on chauffe, la relation $PV = nRT$ illustre la dépendance fonctionnelle entre pression (P) et température (T). Si on trouve une valeur de pression plus faible après chauffage que la valeur de départ, cette réponse est illogique. Un étudiant qui ne peut pas voir cette incongruité témoigne de réduction fonctionnelle : il ne voit pas cette dépendance fonctionnelle entre les variables. Les dépendances fonctionnelles sont « un élément majeur du contrôle des résultats qu'on obtient à la fin d'un calcul » (Viennot, 1992, p. 128). On peut assimiler cette contrainte à un raisonnement basé sur les symboles, et son expression correspond au **schéma D** du processus *modèles mentaux* → *réponse*, où c'est l'agencement entre les concepts qui est incorrect et qui mène à la mauvaise réponse.

Ces biais contraignent le raisonnement dans différentes situations, pas uniquement en sciences, et pourraient expliquer la présence de certaines conceptions alternatives, tout en fournissant un levier sur lequel appuyer les stratégies de changement conceptuel.

2.5.4 Lorsque c'est l'agencement des concepts qui fait défaut

Dans les sections précédentes, on a vu que certains chercheurs se sont intéressés à l'expression incorrecte de la logique lors des raisonnements en science. Mais qu'est-ce que la logique, et comment les étudiants peuvent effectivement avoir de la difficulté, comme au **schéma D** du processus *modèles mentaux* → *réponse*, avec le simple agencement logique d'idées par ailleurs correctes? Voici un aperçu de ce que les écrits de recherche apportent comme éclairage sur la question.

2.5.4.1 Propositions logiques

Les avancées de la psychologie cognitive ont montré l'importance des habiletés cognitives pour l'acquisition des connaissances dans les cours de sciences (Lawson, 1994).

En effet, le discours scientifique prend la forme de propositions logiques, des énoncés propositionnels qui constituent en réalité des définitions s'emboîtant les unes dans les autres, détaillant la somme des connaissances d'une discipline. On pourrait s'attendre à ce qu'en comprenant chaque énoncé propositionnel, les étudiants acquièrent la connaissance délimitée par ces énoncés. Mais un tel schéma idéal de l'apprentissage n'est pas réaliste (Piburn, 1990), parce que les énoncés ne sont pas explicitement rendus disponibles aux étudiants. En effet, les enseignants utilisent ces énoncés plus ou moins implicitement lorsqu'ils les adaptent du savoir savant vers le savoir à enseigner dans la transposition didactique (Astolfi et coll., 2008). Ce sont des balises ou des pierres d'angle autour desquelles ils construisent les leçons. Ces énoncés n'existent alors pas dans un format facilement accessible aux étudiants : ils peuvent se trouver pêle-mêle dans le discours des enseignants, dans le corps de texte des manuels, dans des glossaires, etc. Il peut dans ce cas être difficile pour les étudiants de les faire ressortir et de bien prendre conscience des relations entre eux.

Ensuite, même si les énoncés propositionnels étaient clairement fournis aux étudiants, cela ne conduirait pas nécessairement à un apprentissage linéaire et sans faille. En effet, la recherche a montré que même les énoncés propositionnels les plus élémentaires sont souvent mal interprétés d'un point de vue logique par les étudiants, et même par les adultes (Piburn, 1990).

Dans des tests pour mesurer le raisonnement logique, le taux de succès pour certains types d'énoncés ne se situait qu'autour de 11 % à 17 % pour les élèves de la fin du secondaire (Piburn, 1990) et n'augmentait pas significativement pour les étudiants en début de parcours à l'université.

2.5.4.2 Difficultés logiques et difficultés en sciences

Ces difficultés logiques ont un impact négatif sur le succès en science, ce que Bird (2010) a mis en lumière pour des étudiants de chimie au niveau postsecondaire. Elle a ainsi mesuré les habiletés de raisonnement de 466 étudiants américains à l'aide du test GALT (*Group Assessment of Logical Thinking Test*), un instrument de mesure standardisé servant à classer les étudiants selon leur stade de développement cognitif (Roadranga, 1991). Ces habiletés se sont avérées un prédicteur valide de la performance des étudiants au cours des deux semestres du cours de chimie générale, le premier cours postsecondaire de chimie aux États-Unis, qui est comparable au premier cours de chimie du niveau collégial québécois. Les étudiants au stade opératoire formel, le stade de développement le plus élevé selon le modèle piagétien, ont réussi significativement mieux au test de chimie générale de l'*American Chemical Society* que ceux qui avaient été classés à un stade cognitif inférieur. Les approches employées par les étudiants face à un problème qui pourrait être résolu algébriquement ou conceptuellement variaient significativement en fonction du stade opératoire de l'étudiant, et les étudiants au stade opératoire formel avaient une plus forte tendance à appliquer une approche conceptuelle. Toutefois, la plupart des étudiants ayant participé à cette étude (59 %) n'avaient pas atteint le stade opératoire formel, une observation qui a maintes fois été faite chez des étudiants de cet âge (Driver & Easley, 1978). (Bird, 2010) en conclut que, comme la majorité des étudiants n'ont pas atteint le stade opératoire formel, ils ont les habiletés algorithmiques nécessaires pour atteindre le niveau scolaire et être admis à l'université, mais n'auront pas les capacités de raisonner sur les résultats pour les interpréter, en particulier au niveau moléculaire.

Il est toutefois pertinent de rester prudent sur la relation de causalité entre le stade de la pensée atteint par un étudiant et sa capacité à résoudre des problèmes conceptuels en sciences : en effet, ce qui a été démontré par Bird et les autres est que les étudiants qui n'ont pas atteint le stade opératoire formel ont aussi de la difficulté à répondre à des questions conceptuelles en sciences. On a établi une corrélation entre les deux observations, mais la causalité entre les deux

n'est pas démontrée. Le stade opératoire formel et le raisonnement conceptuel sont peut-être deux habiletés qui se développent en parallèle, mais l'une n'est peut-être pas la cause de l'autre.

A contrario, d'autres recherches tendent à montrer que le manque de raisonnement formel chez les étudiants n'exclut pas nécessairement l'habileté à résoudre des questions conceptuelles (Igaz & Proksa, 2012). Dans une recherche avec des élèves du secondaire, Igaz et Proksa ont en effet mesuré en parallèle le niveau de développement cognitif et l'habileté à résoudre des questions numériques, conceptuelles ou basées sur un contexte de la vie de tous les jours en chimie. Ils ont observé entre autres que certains étudiants ne parvenaient pas à répondre à une question conceptuelle sans accompagnement; l'accompagnement qui leur était fourni ensuite, sous forme d'une aide au raisonnement, leur permettait généralement alors de répondre correctement à la question. Il est difficile, par contre, de discriminer si l'accompagnement offert aidait les étudiants seulement pour leur raisonnement, ou s'il pouvait les aider à propos des concepts de chimie eux-mêmes. Quoiqu'il en soit, les recherches montrent que les étudiants ont, en parallèle, des difficultés conceptuelles et de raisonnement en sciences.

Lilian Bird (2010) recommande aux enseignants d'éviter d'enrichir le contenu du cours avec des notions qui, de toute façon, ne seront pas à la portée des capacités de raisonnement des étudiants. De plus, en écho à ce qu'ont proposé d'autres chercheurs (Lawson, 1994), elle invite les enseignants à développer systématiquement les habiletés de raisonnement des étudiants, par exemple en proposant des exercices de calcul proportionnel, un type de raisonnement particulièrement difficile utilisé dans tous les cours de science, même en biologie, qui n'est pourtant pas une discipline reconnue pour employer beaucoup les mathématiques.

D'autres groupes de chercheurs ont aussi obtenu des résultats comparables quant à la relation entre le succès en science et le stade de développement cognitif (Cantu & Herron, 1978), notamment chez les étudiants collégiaux québécois (Torkia-Lagacé, 1981).

Piburn (1990) a étudié plus précisément les erreurs de raisonnement les plus à même d'expliquer le faible succès en science. La difficulté des étudiants à interpréter correctement des propositions logiques n'est pas uniquement imputable à une incompréhension de la structure logique, mais à une limitation structurale. Cette dernière pourrait être à l'origine des conceptions alternatives dans lesquelles un étudiant interprète mal une proposition logique, comme une définition ou un raisonnement syllogistique en quelques étapes. Les informations nécessaires seraient ainsi encodées incorrectement dès qu'on les présente aux étudiants, parce que ces

derniers ne les comprennent pas et ne peuvent pas les comprendre (Piburn, 1990). Dans un cas comme celui-là, la mauvaise réponse à une question prendrait sa source dans des conceptions alternatives, et non pas dans l'expression incorrecte d'un raisonnement logique au moment d'y répondre.

Selon Piaget, il existe une logique naïve différente de la logique experte, comme il existe des conceptions naïves en physique, différentes de la conception scientifique (Beth & Piaget, 1966). Cette logique naïve est corrélée à un faible succès en science, un peu comme l'est la présence de conceptions alternatives dans l'esprit de l'étudiant. Il semble ainsi fertile d'étudier chez des étudiants qui présentent des conceptions alternatives la relation entre celles-ci et l'expression de logiques naïves.

2.6 Sommaire du cadre conceptuel

On a inventorié de nombreuses conceptions alternatives chez les étudiants postsecondaires en chimie autour des concepts de la nature corpusculaire de la matière, de la liaison chimique, de la géométrie moléculaire et des phénomènes macroscopiques. Les chercheurs s'entendent pour dire que la première étape pour favoriser le changement conceptuel est de connaître les conceptions alternatives des étudiants, mais qu'il ne faut pas négliger les structures et mécanismes cognitifs qui les mettent en scène lorsque de mauvaises réponses à des questions sont données.

Le raisonnement est le passage des idées tacites aux réponses manifestes. Ces réponses, lorsqu'elles sont incorrectes, proviennent soit de conceptions alternatives (ce qu'on a appelé le schéma B du processus *modèles mentaux* \rightarrow *réponse*), soit d'un manque de connaissances (le schéma C du processus *modèles mentaux* \rightarrow *réponse*), soit encore d'un agencement incorrect de concepts (schéma D du processus *modèles mentaux* \rightarrow *réponse*). Ces schémas, basés sur d'autres typologies proposées par différents auteurs, sont élaborés ici pour offrir un cadre de lecture mettant en relation les conceptions alternatives, les modes de raisonnements et les mauvaises réponses.

Il faut en retenir que ce ne sont pas toutes les mauvaises réponses qui proviennent de conceptions alternatives : certaines proviennent d'un manque de connaissances, d'autres d'un agencement incorrect de concepts. Comme toutes les mauvaises réponses d'étudiants sont problématiques lors de l'enseignement, il est pertinent de toutes les considérer, comme cela est

fait dans ces quatre modèles du processus *modèles mentaux* → *réponse*. En particulier, il est intéressant de considérer les difficultés logiques des étudiants de niveau postsecondaire, qui, on l'a vu, ont souvent été mentionnées dans les écrits de recherche.

Au chapitre suivant, les questions spécifiques de la recherche seront présentées. Dans le chapitre subséquent, les moyens méthodologiques à mettre en place pour répondre à ces questions seront détaillés.

Rapport-Gratuit.com

3 Questions de recherche

Pour répondre à la question générale de recherche, soit « **Quelles conceptions alternatives et quels modes de raisonnement mènent les étudiants à faire de mauvaises prédictions en chimie ou à donner de mauvaises explications du comportement de la matière?** », cinq questions spécifiques seront poursuivies :

1. Quelles sont les conceptions alternatives les plus fréquentes en chimie autour des concepts de la molécule, de la liaison chimique, de la polarité et des phénomènes macroscopiques chez les étudiants du programme de Sciences de la nature?
2. Quelles sont les différences, s'il en existe, entre la nature et la fréquence des conceptions alternatives en chimie des étudiants qui commencent leurs cours de chimie et les finissants du programme de sciences?
3. Quelles prédictions incorrectes ou explications incorrectes sont-elles attribuables à des conceptions alternatives, et lesquelles sont-elles plutôt attribuables à d'autres schémas menant des modèles mentaux aux réponses?
4. Par quels processus *modèles mentaux* → *réponse* les étudiants collégiaux arrivent-ils à des réponses incorrectes (ou correctes) à des questions en chimie?

La réponse à ces questions nécessite de mettre en place une méthodologie particulière, qui vise d'une part la mise en lumière des conceptions alternatives, et d'autre part qui permet l'inférence des modes de raisonnement utilisés par les étudiants lorsqu'ils invoquent leurs modèles mentaux – corrects ou incorrects selon la théorie scientifiquement acceptée – pour répondre à des questions en chimie.

Le prochain chapitre présentera les moyens à mettre en action pour répondre à de telles questions de recherche.

4 Cadre méthodologique

4.1 Repérer et comprendre les conceptions alternatives

L'étude des conceptions alternatives et leur mise en lumière chez les étudiants constituent une forme d'évaluation de l'état des lieux conceptuel et est importante pour la planification de l'enseignement. « L'analyse des représentations a ainsi pour but d'anticiper les obstacles que les élèves risquent de rencontrer sur le chemin des acquisitions scientifiques » (Astolfi et coll., 2008, p. 95). Au fil des ans, on a proposé plusieurs méthodes pour étudier les conceptions alternatives. Wandersee et ses collaborateurs (1994) listent en particulier l'entrevue clinique, la cartographie conceptuelle, les items à choix multiples et la simulation informatisée. Toutefois, selon ces chercheurs, la méthode la plus utilisée pour reconnaître les conceptions demeure l'entrevue clinique (Wandersee et coll., 1994).

L'entrevue clinique est une technique qui place le sujet interviewé devant une tâche à accomplir, au sujet de laquelle il doit verbaliser son action pendant qu'il la réalise (Van der Maren, 1996). Le sujet exprime ainsi ses réflexions et ses prises de décision dans un contexte réel, ce qui met en évidence les processus mentaux qu'il emploie et, éventuellement, les conceptions alternatives qui meublent son esprit à propos des concepts qu'il invoque lors de sa réalisation.

Peterson, Treagust et Garnett (1989) ont toutefois souligné les limites de l'utilisation de l'entrevue clinique par les enseignants en contexte de classe. Notamment, cette méthode est particulièrement chronophage et ne semble pas utilisable au quotidien avec une classe complète.

En ce sens, l'entrevue clinique est une méthode holistique pertinente pour les études de cas ou les autres designs expérimentaux de la tradition ethnographique, mais pas pour l'utilisation avec plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'étudiants. Elle nécessite aussi que les intervieweurs aient reçu une formation pour mener de telles entrevues, en analyser les données et en interpréter les résultats, ce qui n'est généralement pas le cas des enseignants. Enfin, les résultats de l'entrevue clinique sont peu généralisables à la population, puisque les chercheurs qui l'emploient n'ont pas pour visée de procéder à la description de celle-ci, mais plutôt de décrire en profondeur les quelques cas interviewés.

Pierre Vermersch (1994, éd. 2006) propose quant à lui une autre façon de mener les entrevues avec les étudiants, dans ce qu'il appelle l'entretien d'explicitation. Cette forme d'entretien, favorisée par de nombreux professionnels comme les orthopédagogues, les médecins, les responsables des ressources humaines, mais aussi les chercheurs en didactique, s'appuie sur trois « faire », que les étudiants interviewés réalisent. Le premier « faire » est la tâche que l'intervieweur demande à l'étudiant de réaliser; ce peut être résoudre un problème mathématique, construire un modèle moléculaire, assembler une maquette, etc. Le deuxième « faire » concerne la description du faire : l'étudiant interviewé doit décrire ce qu'il fait. Le troisième « faire » est de décrire comme l'étudiant décrit le faire, tâche qui revient au chercheur qui rapporte le faire de l'étudiant interviewé. Le but de l'entretien d'explicitation est de rendre explicites par la verbalisation de l'action des savoir-faire qui sont tacites.

La verbalisation du faire ne va pas sans écueils. En effet, l'action est généralement une connaissance autonome, et certains automatismes peuvent être impossibles à verbaliser, car ils ne sont pas conceptualisés par les étudiants; de plus, le fait de verbaliser son action n'est pas une tâche habituelle, ce qui peut causer un blocage durant l'entretien; ensuite, le vécu est une globalité qui ne se différencie pas en domaines spécialisés, mais s'articule souvent dans des actions aux contours flous.

Vermersch propose de mener l'entretien d'explicitation en s'appuyant plutôt sur le souvenir d'une action passée. L'entretien se déroule alors comme le récit autobiographique de l'étudiant qui détaille le souvenir de l'action. Même si la tâche n'a pas été réalisée longtemps dans le passé, même quelques minutes seulement avant la verbalisation, la prise de parole de l'étudiant consiste alors plutôt en une description du passé qu'à une mise en mots de l'action présente. Ainsi, il est plus facile à l'étudiant de décrire son action (passée), parce qu'il passe directement, dans sa tête, de la description à la mise en mots. Dans cet état d'explicitation, l'étudiant est présent en esprit au moment du vécu de l'action.

Cette technique d'entretien permet donc de toucher au plus implicite de la pensée d'un individu réalisant une tâche, tout en préservant les écueils de la difficulté qu'on peut ressentir à faire et dire simultanément. L'entretien d'explicitation a notamment été utilisé en didactique de la physique, au Québec (Potvin & Thouin, 2003). L'avantage de la méthode proposée par Vermersch pour les études en didactique est qu'elle évite que les étudiants ne donnent une raison seulement pour répondre à la question pourquoi, alors que lorsqu'ils décrivent leur action, un

chercheur attentif pourra interpréter leur verbalisation de l'action pour trouver ces raisons, sans avoir à les provoquer.

Toutefois, comme pour l'entretien clinique, l'entretien d'explicitation nécessite des chercheurs formés, et des ressources de temps importantes.

Pour permettre le questionnement de plusieurs étudiants dans un temps plus court, Peterson et ses collaborateurs proposent plutôt d'utiliser, pour faire ressortir les savoir-faire sous-tendant l'action, un questionnaire à choix multiples, qu'on aurait aussi conçu précisément pour la détection des conceptions alternatives. Comme celles-ci ne sont souvent pas détectables dans un contexte traditionnel d'enseignement (Driver et Easley, 1978), les questionnaires à choix multiples traditionnels ne sont pas pertinents pour repérer les conceptions alternatives dans l'esprit des étudiants. En effet, ce type de questionnaire sert le plus souvent à mesurer des connaissances ou des habiletés, rarement à mesurer l'étendue des difficultés et obstacles à l'apprentissage. Pour qu'un questionnaire à choix multiples soit pertinent pour détecter les conceptions alternatives, il devrait aussi sonder les modèles mentaux employés par les étudiants pour répondre à des questions de contenu. Ainsi, on retrouverait, dans un format plus léger, certains avantages de l'entrevue clinique.

Pour ce faire, un groupe de recherche (Peterson et coll., 1989; Treagust, 1988) a proposé la construction d'un questionnaire à choix multiples à deux paliers, qui réconcilie ces deux aspects en un outil facile d'utilisation. Les deux paliers de chaque item concernent une même question de contenu en science. Le premier palier mesure le plus souvent une connaissance dans une question à choix multiples; le deuxième palier sonde les raisons pour lesquelles le répondant a sélectionné une telle réponse au premier palier.

Ce type d'items permet de mettre en lumière les conceptions alternatives parce qu'ils exigent que les étudiants invoquent leurs représentations et modèles explicatifs, qui sont souvent en inadéquation avec la théorie scientifique. Ainsi, les étudiants qui ont une bonne réponse au premier palier peuvent quand même avoir sur le sujet dont il est question une conception alternative, qui est repérée au regard de la justification qu'ils invoquent au deuxième palier.

De nombreux chercheurs ont utilisé de tels outils pour la détection des conceptions alternatives en chimie (Chandrasegaran, Treagust, & Mocerino, 2007; Othman et coll., 2008; Peterson, Treagust, & Garnett, 1986; Tan, Goh, Chia, & Treagust, 2002), mais aussi en physique (Chu, Treagust, & Chandrasegaran, 2009) et en biologie (Haslam & Treagust, 1987; Tsui &

Treagust, 2010). Cette méthodologie semble adaptée au contexte de la présente recherche, puisqu'elle combine la puissance de la recherche sur le raisonnement des étudiants permise par l'entrevue, tout en augmentant les possibilités de généralisation des résultats en utilisant aussi les avantages du questionnaire à choix multiples. Au Québec, Robitaille (1997) a utilisé cette méthode dans le cadre d'une étude sur les conceptions alternatives en biologie au niveau collégial, montrant l'applicabilité de cette méthode dans ce contexte.

Il est à noter que la plupart des didacticiens qui emploient le questionnaire à deux paliers le nomment « *two-tier diagnostic instrument* » (par exemple, Chandrasegaran et coll., 2007; Peterson et coll., 1989; Tan et coll., 2002). Le vocable « diagnostique » n'a pas été conservé ici, pour des raisons similaires à celles, mentionnées plus tôt, qui ont fait préférer l'expression « conceptions alternatives » à celle, encore fréquente dans les écrits de recherche, de « conceptions erronées ». Dire qu'on pose un diagnostic des conceptions des étudiants reviendrait à considérer ces conceptions comme nécessairement fautives, alors que d'une part, les conceptions même les plus squelettiques peuvent servir de tremplin à l'apprentissage d'une notion scientifique, et que d'autre part, les observations scientifiques, dans une perspective constructiviste, ne sont pas des vérités fondamentales, mais plutôt une construction efficace dans le cadre d'un projet défini par la communauté (Fourez, 1996).

La position épistémologique préférée ici sera donc celle faire l'analyse didactique des conceptions alternatives, plutôt que de poser un diagnostic. La méthode retenue permet de faire une telle analyse, simplement en se gardant d'instrumentaliser ses résultats en en parlant comme d'un diagnostic. Voici sommairement les 10 étapes proposées par David Treagust (1988) pour le développement du questionnaire à deux paliers pour réaliser une telle analyse.

4.1.1 Définir le contenu

4.1.1.1 Étape 1 : Rédiger les énoncés propositionnels

Les énoncés propositionnels sont des phrases qui détaillent chacune une portion du domaine de connaissance visé par l'outil à deux paliers. La personne qui formule les énoncés propositionnels doit être non seulement un spécialiste disciplinaire, mais de façon plus importante encore, un enseignant. En effet, seul l'enseignant connaît le niveau de formulation adéquat pour le degré scolaire auquel est enseignée la matière au sein de laquelle s'inscrit

l'énoncé de contenu. Voici un exemple d'énoncé de contenu pour la géométrie moléculaire : « Une molécule qui a quatre paquets d'électrons de valence autour de son atome central adoptera une géométrie de répulsion de forme tétraédrique ». L'énoncé propositionnel doit être suffisamment concis pour n'être constitué que d'une phrase et doit être considéré comme exact selon les modèles scientifiquement acceptés.

4.1.1.2 Étape 2 : Développer une carte conceptuelle

Afin de mettre en évidence les relations entre les concepts visés par le questionnaire, on élabore une carte conceptuelle. Pour ce faire, on représente les concepts scientifiques qui font partie du contenu au niveau académique des étudiants auxquels s'adresse la recherche, en les reliant entre eux selon leur lien de causalité ou selon leur épistémologie.

4.1.1.3 Étape 3 : Relier les énoncés et la carte

Chaque notion ou concept présent dans la carte conceptuelle doit être défini par un énoncé propositionnel. La tâche de relier la carte et les énoncés permet de s'assurer de la cohérence entre les contenus définis à l'étape 1 et à l'étape 2.

4.1.1.4 Étape 4 : Valider le contenu

Afin de s'assurer que les énoncés propositionnels et leur relation à la carte conceptuelle sont en accord avec les principes scientifiques et correspondent au contenu enseigné au niveau académique visé, des experts de contenu et des enseignants doivent les valider.

4.1.2 S'enquérir des conceptions alternatives des étudiants

4.1.2.1 Étape 5 : Examiner les écrits scientifiques

Après avoir dressé la liste des concepts scientifiquement acceptés dans le paradigme actuel de la science, on doit également inventorier les conceptions alternatives sur les thèmes à l'étude. Comme présenté précédemment, plusieurs conceptions alternatives en chimie ont déjà été détectées chez différentes populations étudiantes.

4.1.2.2 Étape 6 : Mener des entretiens non structurés avec les étudiants

Afin de s'assurer de l'applicabilité de la recherche antérieure à la population à laquelle on s'intéresse, et pour « obtenir une perspective large de la compréhension des étudiants sur le thème à l'étude » (Treagust, 1988, p. 162, traduction libre), on mène des entretiens avec des étudiants. Ce type d'entretien implique que « le chercheur prépare ou établit un schéma d'entretien qui consiste en une série de thèmes pertinents à la recherche. Ces thèmes proviennent du cadre théorique de la recherche à l'intérieur duquel les concepts étudiés sont définis et leurs dimensions identifiées » (Karsenti & Savoie-Zajc, 2004, p. 133). Ainsi, les thèmes des entretiens sont les concepts déterminés à l'étape de la carte conceptuelle (étape 2). La méthode de l'entretien semi-dirigé permet de recueillir des données riches sur un sujet par rapport auquel on est encore au niveau de l'exploration, pour mettre en lumière les représentations des étudiants et mettre l'accent sur les concepts les plus problématiques lors de leur apprentissage. La suite de l'étude servira à confirmer ces premières impressions sur les conceptions alternatives des étudiants.

4.1.2.3 Étape 7 : Développer des items à choix multiples avec justification ouverte

À cette étape, on élabore un premier test à choix multiples avec les conceptions répertoriées à l'étape 5 et les énoncés de contenus de l'étape 1. Par exemple, ce questionnaire pourrait présenter un item comme : « Quelle est la géométrie moléculaire de la molécule de fluorure de phosphore, de formule chimique PF_3 ? » Les choix pourraient être : a. Pyramidale à base triangulaire (réponse correcte); b. Tétraédrique (incorrect); c. Carrée plane (incorrect); d. Pyramidale à base carrée (incorrect).

La deuxième partie de chaque item est une question ouverte, identique pour tous les items du questionnaire : on demande aux étudiants d'expliquer pourquoi ils ont fait ce choix. L'objectif de ce test est d'inventorier les raisons qui sont invoquées pour justifier une mauvaise réponse, et de recouper ces raisons avec les conceptions observées lors des entretiens. Ces raisons seront ensuite utilisées pour le deuxième palier de l'outil final (étape 8).

4.1.3 Développer le test pour les conceptions

4.1.3.1 Étape 8 : Développer le test à deux paliers à choix multiples

Les deux paliers dont il est question ici recourent les deux niveaux de l'outil présenté à l'étape précédente. Le premier palier y est identique : une question à choix multiples sur un item de contenu. Mais le deuxième palier est un deuxième choix de réponses, les choix étant établis à l'aide des raisons les plus souvent invoquées lors de la passation du questionnaire précédent. La pertinence de développer ce genre d'outil est que les résultats qu'il produit sont plus aisément traitables que des réponses ouvertes. Ainsi, il devient possible d'administrer cet outil à un échantillon beaucoup plus vaste.

4.1.3.2 Étape 9 : Élaborer une grille de spécification

Une grille de spécification est une matrice qui répertorie les connaissances nécessaires pour répondre à chaque item d'un test. La constitution d'une grille de spécification permet de s'assurer que les items développés couvrent bien tous les contenus à l'étude, tels que définis dans les énoncés propositionnels et dans la carte conceptuelle.

4.1.3.3 Étape 10 : Raffinements continus

Dans une perspective de développement continu, on pourra et on devra améliorer le test développé en suivant les étapes précédentes au fil de ses passations avec des groupes d'étudiants, selon les réponses obtenues et l'analyse des résultats.

4.1.4 Précaution pour le développement d'items à deux paliers

Quand on développe un outil à deux paliers, il faut veiller à ne pas donner dans les justifications (deuxième palier) « d'indices » qui aiderait par la suite les étudiants à trouver la bonne réponse (au premier palier). Cette précaution n'est pas toujours prise dans les questionnaires à deux paliers. Dans l'item présenté à la figure suivante, tiré d'Othman et coll. (2008), la justification 1 correspond exactement et exclusivement au choix A, la justification 2 au choix B, la justification 3 au choix C et la justification 4 au choix D. L'intérêt du deuxième palier est perdu, puisqu'on vérifie seulement que les étudiants ont compris que toutes les questions sont construites sur ce modèle.

A sample of solid sulphur has the following properties:

- (I) brittle,
- (II) melting point 113°C.

Which, if any, of the above properties would be the same for one single atom of sulphur obtained from the sample?

- A. I and II
- B. I only
- C. II only
- D. None of the properties.

Reason

1. An atom is the smallest particle of an element that has the same properties as the element.
2. A sulphur atom has smooth faces and sharp edges and so breaks easily when a force is applied.
3. Sulphur is a non-metal therefore the sulphur atom melts at a relatively low temperature.
4. The properties of an element are a result of the interactions of its individual particles.

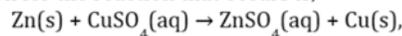
Figure 5 : Exemple d'un item où chaque justification au deuxième palier correspond manifestement à une seule option du premier palier

D'autres questionnaires à deux paliers, probablement pour éviter de donner un indice aussi manifeste, recourent à des justifications qui ne sont pas vraiment des raisons pour lesquelles les choix du premier palier pourraient être faits. Dans l'item suivant, tiré de Chandrasegaran et coll. (2007), les réponses au premier palier et les justifications au deuxième palier semblent être huit choix de même nature, les quatre justifications n'étant pas vraiment des raisons pour lesquelles le choix au premier palier aurait été fait.

Item 14

When powdered zinc is added to blue aqueous copper(II) sulfate and the mixture shaken, the blue colour of the solution gradually fades and it becomes colourless. At the same time a reddish-brown deposit is produced.

The chemical equation for the reaction that occurs is,



while the ionic equation is, $\text{Zn(s)} + \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + \text{Cu(s)}$.

Why did the solution finally become colourless?

- A Copper has formed a precipitate.
- B Zinc is more reactive than copper(II) sulfate.
- C The copper(II) sulfate has completely reacted.
- D Zinc has dissolved, just like sugar dissolves in water.

The reason for my answer is:

- 1 Zinc ions are soluble in water.
- 2 Zinc loses electrons more readily than copper.
- 3 Soluble, blue Cu^{2+} ions have formed insoluble, reddish-brown copper atoms.
- 4 In aqueous solution Cu^{2+} ions produce a blue solution, while Zn^{2+} ions produce a colourless solution.

Figure 6 : Exemple d'un item où le deuxième palier ne représente pas des justifications pour le choix au premier palier

Un outil pour la passation de questionnaires à deux paliers à choix multiples qui, au deuxième palier, ne donnerait pas d'indice pour répondre au premier, mais proposerait des justifications naturelles d'étudiants améliorerait la qualité d'évaluation de ce type d'outil.

Certaines recherches employant le développement d'outils à deux paliers proposent des items convenablement formulés. À la figure 7 est présenté un tel exemple d'item bien conçu, tiré de Treagust (1988) : les justifications n'indiquent pas aux étudiants comment répondre au premier palier, et ce sont réellement des raisons qui peuvent expliquer le choix au premier palier. Cet item traite de biologie; il est intéressant de noter que tous les items de chimie des études répertoriées ici posaient des problèmes de conception, notamment en ce qui a trait aux indices donnés entre le deuxième et le premier paliers. Ceci montre qu'il est difficile de concevoir des items qui présentent à la fois de vraies justifications tout en ne donnant pas d'indice aux étudiants s'ils les voient avant de faire leur choix au premier palier.

Which gas is taken in by green plants in large amounts, when there is no light energy at all?

- (1) carbon dioxide gas
- (2) oxygen gas.

The reason for my answer is because:

- (a) This gas is used in photosynthesis which occurs in green plants all the time.
- (b) This gas is used in photosynthesis which occurs in green plants when there is no light energy at all.
- (c) This gas is used in respiration which only occurs in green plants when there is no light energy to photosynthesize.
- (d) This gas is used in respiration which takes place continuously in green plants.

Figure 7 : Exemple d'un item à deux paliers bien conçu

4.2 L'inférence des processus du raisonnement (*modèles mentaux* → *réponse*)

Dans une autre perspective, la méthode développée par Treagust ne permet pas d'évaluer les modes de raisonnement des étudiants qui démontrent, dans les traces écrites de la réponse à un questionnaire à choix multiples, la présence de conceptions alternatives dans leurs structures cognitives, ni ne permet de voir par quel processus *modèles mentaux* → *réponse* ils arrivent à la mauvaise (ou la bonne) réponse. Il semble toutefois possible d'utiliser les données recueillies à l'étape 7 de la méthode Treagust (lors du développement des items à justification ouverte) d'une façon jusqu'à maintenant inédite pour inférer ces processus du raisonnement.

Cette utilisation originale de données auparavant laissées de côté dès les premières étapes des recherches viserait à combler les lacunes repérées dans les écrits scientifiques sur les modes de raisonnement des étudiants de chimie au niveau postsecondaire, en particulier au niveau collégial québécois. Cette section présente ce qui se fait habituellement pour une telle inférence des modes de raisonnement.

Les types de raisonnement en chimie, tels que proposés par l'équipe de Vicente Talanquer (Christian & Talanquer, 2012; Maeyer & Talanquer, 2010; McClary & Talanquer, 2011; Talanquer, 2006, 2009), sont inférés à partir de réponses d'étudiants qui accomplissent

une tâche en chimie, par exemple lorsqu'ils prédisent la force des acides (McClary & Talanquer, 2011) ou qu'ils classent des substances selon leurs propriétés (Maeyer & Talanquer, 2010).

McClary et Talanquer (2011) ont interviewé dix-neuf étudiants universitaires qui devaient prédire la force d'acides et expliquer leur raisonnement. Ces entretiens leur ont permis de dégager les modèles mentaux sur lesquels ces étudiants se basaient pour répondre.

Maeyer et Talanquer (2010) ont quant à eux fait passer à 414 étudiants universitaires un test à choix multiples dont les six questions portaient sur la même tâche, soit le classement de composés selon quelques propriétés physicochimiques, comme la température de fusion, la solubilité dans l'eau ou le caractère acidobasique. Ce classement ne permettant pas à lui seul de connaître le mode de raisonnement des étudiants, ces chercheurs ont aussi mené des entrevues avec trente-quatre autres étudiants de la même population, qui devaient alors répondre au même test à choix multiples, en réfléchissant à voix haute en accomplissant la tâche. Les entrevues ont permis aux chercheurs de classer le raisonnement des étudiants selon les heuristiques qu'ils utilisent en répondant à ce type de questions, soit l'heuristique de la similarité, de la proximité et de la décision basée sur un seul facteur (*One-reason decision-making*).

Christian et Talanquer (2012) se sont intéressés aux groupes d'étude en chimie au niveau universitaire et aux modes de raisonnement privilégiés par les étudiants lors des séances d'étude de ces groupes. Pour ce faire, ils ont enregistré les conversations durant les séances d'étude. À l'analyse, les chercheurs ont catégorisé les discussions impliquant un raisonnement selon l'un des quatre types de raisonnement en chimie présentés précédemment à la section page (raisonnement basé sur les règles, sur l'expérience de cas, sur les modèles et sur les symboles).

Mais avant de faire ces recherches empiriques sur le raisonnement des étudiants, Talanquer (2006, 2009) a proposé la typologie du raisonnement de sens commun en chimie présentée précédemment (à la section 2.5.3, page 61) qu'il a élaborée à partir des écrits scientifiques. Sa base d'investigation était principalement les recherches sur les conceptions alternatives des étudiants de tous les niveaux scolaires et universitaires en chimie. Il a ainsi proposé un ensemble de modes de raisonnement et d'heuristiques que son équipe de recherche et lui semblent maintenant chercher à valider par les recherches empiriques répertoriées dans cette section.

La base théorique proposée par Talanquer paraît un point de vue intéressant, même si incomplet et insuffisamment validé, pour chercher les modes de raisonnement en chimie. Pour étudier ces modes de raisonnement, des questionnaires à choix multiples pour repérer les conceptions alternatives ont été utilisés, mais ce sont surtout les entrevues qui demandaient aux étudiants pourquoi ils faisaient tel ou tel choix lors de la résolution d'une tâche en chimie qui permettait aux chercheurs d'inférer leur mode de raisonnement.

Un autre groupe de recherche (Furió et coll., 2000) a dégagé deux modes de raisonnement de sens commun à partir de réponses d'étudiants de 12^e année et d'étudiants universitaires à un questionnaire sur les propriétés des molécules. Ces auteurs ont fait passer un test à choix multiples sur la forme et la polarité des molécules et sur l'équilibre chimique à ces étudiants, qui devaient justifier chacun de leurs choix de réponse. Les deux modes de raisonnement correspondent aux heuristiques de la fixité fonctionnelle et de la réduction fonctionnelle, dont il a été question au chapitre 2, ont été dégagés des réponses des étudiants. Cette méthodologie, qui ressemble dans les faits à un questionnaire à deux paliers dont le deuxième palier est à réponse ouverte, leur a permis de sonder plusieurs étudiants (près de 200) tout en gardant le traitement et l'analyse des données assez simple.

La méthode de Treagust, qui cherche surtout à développer des questionnaires dont les deux paliers sont à choix multiples, utilise la justification ouverte seulement comme un tremplin vers l'outil de collecte de données final. Mais les résultats obtenus par Furió et Calatayud (2000) semblent très riches. C'est pourquoi il paraît pertinent d'utiliser les résultats en cours de développement de l'outil, selon la méthode Treagust, comme des résultats à part entière et tenter d'en extraire les processus par lesquels les étudiants utilisent leurs modèles mentaux pour donner des réponses manifestes. C'est ainsi que la phase pilote de la recherche, en plus de permettre de recueillir plusieurs justifications naturelles d'étudiants et de tester de nombreux items, a servi à dégager des modes de raisonnement dans les justifications des étudiants, qui ont ensuite permis de classer les difficultés conceptuelles retrouvées lors de la phase principale de la recherche.

4.3 Rappel des objectifs de la recherche

Comme l'indiquait le chapitre 3, « Questions de recherche », cette recherche visait les objectifs suivants : (1) mettre en lumière les conceptions alternatives fréquentes; (2) trouver la différence entre les étudiants en début de parcours collégial et les finissants au regard de ces conceptions; (3) faire la distinction entre les mauvaises réponses attribuables à des conceptions alternatives et celles attribuables à d'autres causes; et (4) inférer les processus par lesquels les étudiants passent des modèles mentaux (tacites) aux réponses (manifestes) (processus *modèles mentaux* → *réponse*).

Pour atteindre ces objectifs, la recherche a été divisée en trois phases, qui sont schématisées à la figure 8.

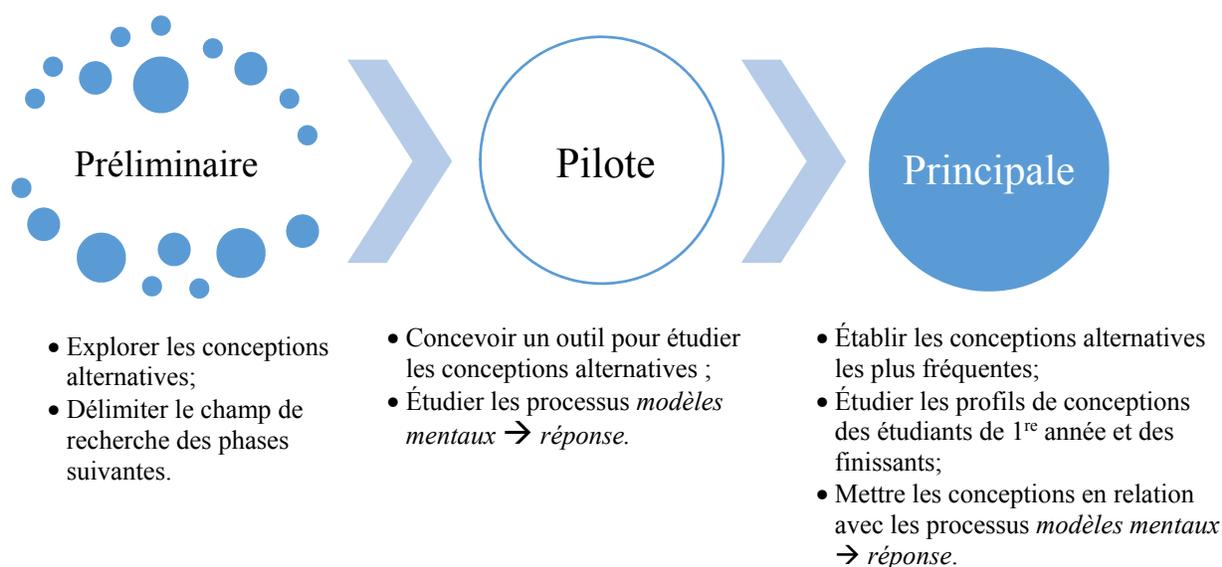


Figure 8 : Activités et objectifs des trois phases de la recherche

Les sections suivantes présenteront en détail les échantillons, les outils de collecte de données et, enfin, le traitement et l'analyse des données pour chacune de ces phases.

4.4 Échantillon

Au total, 2413 étudiants ont participé à cette recherche. Cet échantillon est succinctement décrit dans le tableau qui suit.

Tableau II : Description de l'échantillon expérimental total pour chacune des phases de l'étude

Phase de la recherche	Nombre de participants	Niveau académique	Mode de recherche
Préliminaire	11	Cégep	Entrevues
Pilote	277	Cégep et université	Questionnaires papier
Principale	2125	Cégep	Questionnaires en ligne

4.4.1 Phase préliminaire : exploration des conceptions et choix de l'échantillon

Les concepts de chimie sur lesquels l'étude a porté ont été choisis à la suite d'entrevues cliniques avec des étudiants de première et de deuxième année du programme de Sciences de la nature du cégep André-Laurendeau; ces entrevues ont également permis une première exploration des conceptions des étudiants sur ces sujets. Le tableau III indique le genre et le rendement scolaire de ces étudiants, en plus de préciser où ils étaient rendus dans leurs études.

Tableau III : Description de l'échantillon pour les entrevues cliniques de la phase préliminaire

Sujet	Genre	Rendement scolaire	Année d'études au cégep	Profil du programme de Sciences de la nature
1	M	Moyen	Deuxième	Sciences de la santé
2	F	Moyen	Deuxième	Sciences de la santé
3	M	Fort	Deuxième	Sciences de la santé
4	M	Faible	Deuxième	Sciences pures
5	M	Faible	Deuxième	Sciences pures
6	M	Fort	Deuxième	Sciences pures
7	F	Faible	Deuxième	Sciences de la santé
8	F	Moyen	Première	Pas encore choisi ^a
9	M	Moyen	Première	Pas encore choisi ^a
10	F	Fort	Première	Pas encore choisi ^a
11	F	Faible	Première	Pas encore choisi ^a

^a Au collégial, les étudiants choisissent leur profil à la fin de la première année.

Les étudiants ont participé à la recherche sur une base volontaire. Ils ont été recrutés par courriel. Un seul étudiant contacté a refusé de participer, car il était malade le jour où son entrevue devait avoir lieu. Au moment des entretiens, les étudiants de première année qui ont

participé à l'étude étaient en train de suivre le cours Chimie générale : la matière, 202-NYA-05, et n'avaient reçu aucun enseignement formel en géométrie moléculaire. Les étudiants de deuxième année, quant à eux, avaient tous suivi et réussi ce cours l'année précédente. Parmi eux, ceux qui étaient inscrits au profil Sciences de la santé étaient en train de suivre le cours Chimie organique, un cours réservé aux étudiants de ce profil, alors que ceux du profil Sciences pures ne suivaient aucun cours de chimie au moment des entrevues. Les entrevues se sont déroulées en dehors des heures de cours au cégep André-Laurendeau, durant les trimestres d'automne 2009, d'hiver 2010 et d'automne 2010.

4.4.2 Phase pilote : design de l'outil et modes de raisonnement

La phase pilote visait à développer le test à deux paliers qui serait utilisé lors de la phase principale de la recherche. Dans cette phase pilote, deux cent quarante-sept étudiants de cégep de même que trente étudiants universitaires ont répondu à un questionnaire en chimie. Les étudiants de cégep constituaient la population visée par les objectifs de la recherche, mais l'occasion s'est également présentée pour recueillir des données provenant d'étudiants universitaires.

Tableau IV : Description de l'échantillon pour la phase pilote

Établissement d'enseignement	Nombre d'étudiants et genre		Programme d'études	Année d'études dans le programme
	F	M		
Cégep André-Laurendeau	83	56	Sciences de la nature	Première et deuxième
Cégep Marie-Victorin	19	4	Sciences de la nature	Deuxième
Cégep de Saint-Jérôme	26	13	Sciences de la nature	Première
Cégep de Sorel-Tracy	24	19	Sciences de la nature	Première
Université de Sherbrooke	7	14	Baccalauréat en chimie	Première
Université de Montréal	9	2	Baccalauréat en enseignement des sciences au secondaire	Deuxième

Ces étudiants de niveau collégial ont été sélectionnés parce que les enseignants de ces cégeps avaient accepté de libérer du temps en classe pour participer à l'étude. De la même façon, deux professeurs d'universités québécoises, l'un de la faculté d'éducation, l'autre de la faculté de sciences, ont accepté de faire participer leurs étudiants à cette recherche. Les étudiants ont

participé sur une base volontaire, durant la période libérée par leur enseignant, dans un cours de chimie (3 cégeps), de physique (1 cégep), de chimie physique (Université de Sherbrooke) ou de projet intégré de sciences (Université de Montréal). La collecte de données de cette phase a eu lieu aux trimestres d'hiver 2011, d'automne 2011 et d'hiver 2012.

4.4.3 Phase principale : détermination des conceptions répandues

La phase principale nécessitait un grand nombre d'étudiants de cégep afin de tracer un portrait représentatif de la population visée, c'est-à-dire les étudiants du programme québécois de Sciences de la nature ayant au moins suivi le cours Chimie générale : la matière, 202-NYA-05. Cette condition a été déterminée à la suite des résultats obtenus à la phase précédente : en effet, les étudiants qui suivaient le cours de chimie générale et qui n'avaient donc pas encore reçu d'enseignement formel sur plusieurs concepts visés par la recherche (la polarité, les liaisons intermoléculaires et les changements de phase étant surtout étudiés vers la fin de ce cours) répondaient en vaste majorité « je ne le sais pas » au questionnaire papier. Ce n'était pas le genre de réponse visé par la recherche, puisque les conceptions alternatives recherchées étaient celles dues à la reconstruction personnelle par les étudiants de concepts déjà étudiés en classe.

Basé sur les travaux de Robitaille (1997), l'échantillon visé était constitué au départ des étudiants de la région de Montréal seulement. La collecte de données de cette phase devait commencer en août 2012, mais la grève étudiante de l'hiver 2012 laissait présager qu'il serait difficile d'y procéder à ce moment avec les étudiants des cégeps montréalais (voir, par exemple, "Grève étudiante québécoise de 2012," 2013). Ainsi, dès le trimestre d'hiver 2012 (durant la grève), la chercheuse a communiqué avec les cégeps de l'extérieur de Montréal afin de préparer la collecte de données pour qu'elle commence au moment prévu. Pour ce faire, les coordonnateurs du département de chimie ou de sciences de tous les cégeps et collèges privés de langue française offrant le programme de Sciences de la nature ont été contactés par courriel. Puisque l'outil de collecte de données de la phase principale était un questionnaire Web, la passation dans les cégeps plus éloignés ne posait pas de problèmes d'accès. Au contraire, elle améliorait la généralisabilité des résultats à toutes les régions du Québec.

Pour cette phase de la recherche, 2125 étudiants de 24 établissements⁴ ont répondu au questionnaire en ligne. L'échantillon de cette phase est présenté au tableau V.

Tableau V : Échantillon d'étudiants ayant participé à la phase principale du projet, selon leur établissement d'enseignement

	Nombre d'étudiants et sexe			Âge moyen	Écart-type
	F	M	Total		
Total	1222	903	2125	18,3	1,82
Campus Notre-Dame-de-Foy	2	8	10	19,7	4,03
Cégep André-Laurendeau	130	96	226	18,5	1,93
Cégep Beauce-Appalaches	11	7	18	18,3	0,59
Cégep de Chicoutimi	20	23	43	18,4	1,07
Cégep de Drummondville	76	42	118	18,0	0,96
Cégep de Granby — Haute-Yamaska	57	27	84	18,6	1,37
Cégep de La Pocatière	16	6	22	18,3	1,99
Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue — Amos	13	8	21	18,2	0,51
Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue — Rouyn-Noranda	51	33	84	18,2	1,69
Cégep de l'Outaouais	2	2	4	18,3	0,50
Cégep de Rivière-du-Loup	27	18	45	18,0	0,64
Cégep de Sainte-Foy	9	13	22	17,4	0,59
Cégep de Sorel-Tracy	55	41	96	18,2	1,39
Cégep de Thetford	16	15	31	18,1	0,40
Cégep Garneau	222	159	381	18,3	2,04
Cégep Limoilou — Charlesbourg	51	45	96	18,7	2,34
Cégep Limoilou — Québec	10	2	12	18,1	0,52
Cégep Marie-Victorin	25	13	38	20,1	3,57
Cégep Saint-Jean-sur-Richelieu	20	7	27	19,4	2,65
Cégep de St-Hyacinthe	133	113	246	18,4	2,24
Collège André-Grasset	211	162	373	18,0	1,53
Collège Jean-de-Brébeuf	22	31	53	18,0	0,77
Collège préuniversitaire Nouvelles-Frontières	14	8	22	18,0	0,62
Collège Shawinigan	29	24	53	17,9	0,74

Les étudiants qui le souhaitaient répondaient au questionnaire en ligne, pendant un cours de chimie, typiquement dans un laboratoire informatique. La durée maximale pour répondre au test était de 30 minutes. Cette phase s'est déroulée lors des trimestres d'automne 2012 et d'hiver 2013.

⁴ Sont comptés comme deux établissements distincts les campus du même cégep, par exemple les campus d'Amos et de Rouyn-Noranda du cégep de l'Abitibi-Témiscamingue.

4.4.4 Note sur l'éthique de la recherche

Toutes les phases de la recherche ont été menées après avoir obtenu les certificats d'éthique du Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR) de l'Université de Montréal (certificat d'éthique CPÉR-09-107-D et certificat d'éthique CPÉR-10-107-D). Ces certificats d'éthiques sont placés à l'Annexe G de la présente recherche.

4.5 Outils de collecte de données

4.5.1 Phase préliminaire : entrevues

Les entrevues ont été menées préalablement au début du projet de recherche doctoral comme tel, durant la maîtrise de la chercheuse. Elles visaient à explorer les conceptions des étudiants sur plusieurs concepts de chimie, en particulier la représentation mentale d'un atome, la géométrie moléculaire, la règle de l'octet et l'isomérisation. Il s'agissait d'entrevues cliniques : des tâches étaient proposées aux étudiants, qui devaient à la fois les accomplir et expliquer pourquoi ils prenaient telle ou telle décision au fur et à mesure.

Chaque entrevue comportait trois tâches. Comme première tâche, les étudiants devaient décrire ce qu'est la règle de l'octet, une heuristique utile pour prédire le partage des électrons dans une molécule. La discussion portait ainsi sur les électrons de valence, la structure des atomes et les différences entre les éléments.

Comme deuxième tâche, les étudiants devaient dessiner la structure de Lewis du chlorure de thionyle (SOCl_2) puis en construire un modèle à l'aide de pâte à modeler de différentes couleurs et de pailles. Cette tâche était inspirée de celle de Nicoll (2001), qui demandait de construire une molécule de formaldéhyde (CH_2O). Comme les conceptions sur la tridimensionnalité des molécules étaient investiguées, la molécule choisie, contrairement au formaldéhyde, n'est pas planaire (la molécule de chlorure de thionyle est pyramidale à base triangulaire). Les étudiants qui ne réussissaient pas à faire une structure de Lewis correcte du SOCl_2 devaient, à la place, faire la structure de Lewis et construire un modèle de l'ion ammonium, NH_4^+ , dont la géométrie est tétraédrique. Cet ion a été choisi pour la facilité de sa représentation en structure de Lewis et à cause du fait qu'il est tétraédrique, donc que sa géométrie nécessite une projection tridimensionnelle avec la pâte à modeler. Le méthane, CH_4 ,

aurait été plus facile à dessiner pour les étudiants (tout en ayant la même géométrie), mais comme c'était l'exemple qui était illustrait la géométrie tétraédrique dans le manuel et dans le cours de chimie générale auquel ils étaient inscrits, l'ion ammonium a été préféré pour permettre d'observer le raisonnement des étudiants et non pas seulement leur souvenir de l'exemple utilisé en classe.

Comme troisième tâche, les étudiants devaient observer des représentations tridimensionnelles de molécules en boules et bâtonnets sur un écran d'ordinateur et décider si elles montraient des molécules identiques ou différentes. Certaines représentations illustraient des conformères (molécules identiques placées différemment) et d'autres, des isomères (molécules différentes partageant la même formule moléculaire).

Les entrevues, individuelles, duraient 60 minutes environ. Chaque entrevue a été enregistrée (audio) puis transcrite pour analyse. À la fin des entrevues, une photographie de la construction en pâte à modeler de chaque étudiant a été prise.

4.5.2 Phase pilote : questionnaire à justifications ouvertes

La phase pilote et la phase principale du projet ont suivi assez fidèlement la méthode proposée par David Treagust (1988) pour le développement d'outil à deux paliers pour la détection des conceptions. Les numéros d'étapes qui suivent reprennent ceux qui ont été présentés précédemment dans le chapitre 2, « Cadre conceptuel », et réfèrent à cette méthode.

Pour les étapes 1 à 4 de la méthode développée par Treagust (1988) (déterminer les énoncés propositionnels, développer une carte conceptuelle, relier les énoncés et la carte, et valider le contenu), l'analyse didactique des notions choisies pour cette recherche, soit la notion de molécule, les caractéristiques des molécules, comme leur polarité et leur forme, et les phénomènes observables expliqués par ces caractéristiques des molécules a été réalisée pour déterminer les concepts qui sont reliés à leur apprentissage, en amont et en aval. Pour déterminer ces concepts, les énoncés de compétence du programme collégial de sciences de la nature du Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Science (MESRS), qui s'appelait à l'époque le Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS), puis transitoirement le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie (MESRST), ont été utilisés. Ce sont les énoncés de compétence :

« 00UL – Analyser les transformations chimiques et physiques de la matière à partir des notions liées à la structure des atomes et des molécules » (MELS, 1998, p. 66), pour les concepts en amont de la géométrie moléculaire;

« 00XV – Résoudre des problèmes simples relevant de la chimie organique » (MELS, 1998, p. 79), pour les concepts en aval de la géométrie moléculaire.

Concomitamment, les manuels offerts sur le marché québécois pour le cours Chimie générale 202-NYA ont été utilisés comme base pour l'analyse didactique du concept de géométrie moléculaire. Tous les livres les plus communément utilisés par les enseignants de chimie générale et leurs étudiants dans les classes de cégep ont été utilisés (Chang & Papillon, 2009; Flamand & Allard, 2004; Hill et coll., 2008; Kotz & Treichel, 2005; Reger, Goode, & Mercer, 2000; Zumdahl & Zumdahl, 2007).

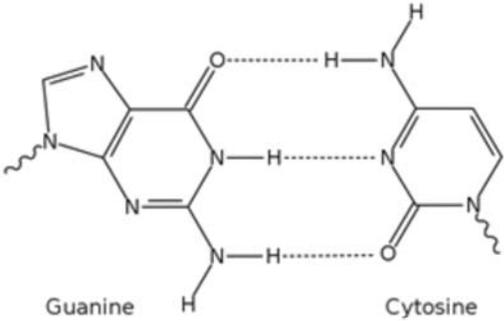
Une liste d'énoncés propositionnels a été dressée afin de cerner le contenu qui ferait partie du questionnaire à deux paliers (voir Annexe B). En parallèle, une carte conceptuelle a été élaborée (voir l'Annexe C). Individuellement décrits par les énoncés, les concepts se trouvent donc également reliés les uns aux autres. Les énoncés propositionnels ont été validés par cinq experts de contenu : quatre enseignants de chimie de quatre cégeps différents et un professeur universitaire de chimie ont confirmé que ces énoncés représentent avec justesse le contenu de chimie visé par la recherche. L'Annexe A de cette thèse, « Notions de chimie », présente une adaptation de ces énoncés. Un enseignant de chimie du Cégep André-Laurendeau a validé l'exactitude du contenu de cette annexe.

Les étapes 5 à 7 visent à obtenir des informations sur les conceptions des étudiants. L'inventaire des conceptions alternatives présenté au chapitre 2, « Cadre conceptuel », témoigne de l'examen des écrits scientifiques qui a été réalisé à l'étape 5. L'étape 6 consiste à mener des entrevues avec les étudiants pour explorer leurs conceptions; il s'agit ici de la phase préliminaire de la recherche, dont il a été question précédemment.

L'étape 7 constitue ce qui est nommé ici la phase pilote de l'étude : il s'agit en effet d'une première passation de questionnaire aux étudiants. Ce questionnaire, selon la méthode décrite par Treagust, présente des items à choix de réponse auxquels on ajoute un deuxième palier, c'est-à-dire qu'il demande aux étudiants de justifier par écrit leur réponse au choix multiple. La figure 9 ci-dessous présente un exemple d'item à choix multiples à deux paliers

avec justification ouverte développé dans le cadre de la présente étude. La bonne réponse est l'option b).

9. Dans le schéma suivant, deux bases de l'ADN sont représentées : la guanine à gauche et la cytosine à droite. Ces deux bases sont dites complémentaires dans l'ADN.



Quel énoncé décrit le plus précisément *ce que représentent les traits pointillés* entre la guanine et la cytosine?

- Des liaisons covalentes polaires.
- Des liaisons intermoléculaires.
- Des liaisons ioniques.
- Des forces électrostatiques.

Expliquez votre réponse.

Test Réponses ouvertes B5.docx

Figure 9 : Un item à deux paliers à justification ouverte développé dans le cadre de cette étude

Soixante items à choix multiples ont été préparés à partir des conceptions répertoriées dans les écrits scientifiques, des résultats à l'étape préliminaire et de l'expérience d'enseignement de la chercheuse. Vingt items étaient adaptés de recherches antérieures (Ayas et coll., 2010; Ben-Zvi et coll., 1986; Furió & Calatayud, 1996; Mulford & Robinson, 2002; Peterson et coll., 1989) et quarante items étaient entièrement originaux. Un assistant de recherche, enseignant de chimie, a conçu une dizaine d'entre eux. Il était nécessaire de développer des items originaux pour couvrir les concepts déterminés aux étapes 1 à 4 que peu d'études antérieures avaient abordés.

Pour la passation aux groupes d'étudiants, neuf versions d'outils ont été préparées, chacune comportant entre 10 et 12 items. En effet, la passation en classe devant durer une trentaine de minutes, un questionnaire de 60 questions aurait été trop long pour les étudiants.

Les buts de la recherche ont été présentés à tous ces étudiants, le jour où ils ont répondu au questionnaire, au cégep ou à l'université où ils étudiaient, par la chercheuse. Le professeur du cours était présent ou non pendant le déroulement du test, dont la supervision était assurée par la chercheuse. Les étudiants ont reçu un document d'information leur expliquant les buts du projet et leur indiquant que leur participation était libre et sans contrainte. Chaque version comportait environ 7 pages, la première d'entre elles étant le document d'information, que les étudiants détachaient et conservaient s'ils acceptaient de participer à l'étude. Chaque étudiant recevait aussi un tableau périodique simplifié (comportant le nom des éléments, leur numéro atomique, leur masse atomique et leur électronégativité) qui était récupéré lorsqu'ils remettaient leur questionnaire rempli. La durée maximale pour répondre au test était de 30 minutes.

4.5.3 Phase principale : le questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes »

Le questionnaire utilisé lors de la phase principale est un questionnaire à choix multiples à deux paliers, nommé le questionnaire MPP (« Molécules, polarité et phénomènes »). Il s'agit d'un questionnaire en ligne, sur la plateforme ConSOL (*Conceptual Science On-Line*), dont il sera question ici. Le questionnaire MPP a été développé en adaptant les recommandations de Treagust (1988).

Après la phase pilote, l'étape qui suit dans la méthode de Treagust, soit l'étape 8, consiste à prendre les items développés et testés à l'étape 7 et à les convertir en items dont les deux paliers présentent des choix multiples. Typiquement, ce sont des choix multiples basés sur les justifications les plus fréquentes recueillies à l'étape 7. Considérant les limites de cette méthode, présentées précédemment (chapitre 2, « Cadre conceptuel »), soit que des indices peuvent être présents dans les justifications et que les étudiants peuvent consulter avant de répondre au premier palier, et que pour contrer cette limite certains items présentent des justifications qui ne sont pas les raisons qu'invoqueraient naturellement les étudiants, une manière différente de celle employée habituellement avec ce genre d'outil pour faire passer les tests à deux paliers a été retenue : plutôt qu'un test sur papier, la phase principale a utilisé un test sur plateforme Web.

La plateforme ConSOL a été développée par Isabelle Harpin, informaticienne à la Maison des technologies de formation et d'apprentissage MATI Montréal, en collaboration avec la Chaire d'étude et de recherche en enseignement des sciences et technologies en milieu

scolaire et collégial, dirigée par Jesús Vázquez-Abad, professeur à la faculté des Sciences de l'Éducation de l'Université de Montréal (Harpin, Cormier, & Vázquez-Abad, 2012; Vázquez-Abad et coll., 2013).

Cette plateforme permet de présenter le premier et le deuxième palier d'un item en deux temps. D'abord, l'étudiant voit l'énoncé de la question et le premier palier de choix de réponse. Lorsqu'il fait son choix et qu'il valide sa réponse, il passe ensuite au deuxième palier, et seulement à ce moment lui présente-t-on les justifications, spécifiquement conçues pour ce choix de réponse en particulier. Cette façon de procéder a deux avantages : d'abord, les étudiants ne peuvent pas baser leur choix de réponse au premier palier sur les « meilleures » justifications du deuxième palier; ensuite, il est possible pour le chercheur de concevoir des justifications réellement appropriées pour chaque choix de réponse, puisque ce ne sont pas les mêmes justifications qui sont présentées si l'étudiant choisit a), b) ou c) au premier palier.

Les saisies d'écran qui suivent montrent le déroulement de réponse à un item sur la plateforme ConSOL.

Université de Montréal  

Conceptual Chemistry On-Line - Question 1/20

QUESTION 1

Voici une liste de propriétés d'un échantillon de soufre solide:

- i. Solide cristallin friable.
- ii. Point de fusion de 113 °C.
- iii. De couleur jaune.

Parmi les propriétés précédentes, laquelle ou lesquelles (s'il y en a) seraient les mêmes pour un seul atome provenant de cet échantillon, si on parvenait à l'isoler?

RÉPONSES

- a- Toutes les propriétés seraient les mêmes.
- b- Aucune propriété ne serait la même.
- c- La propriété iii. seulement serait la même.

Figure 10 : Saisie d'écran du premier palier d'un item à choix multiples du questionnaire MPP sur ConSOL

Conceptual Chemistry On-Line - Question 1/20

QUESTION 1

Voici une liste de propriétés d'un échantillon de soufre solide:

- i. Solide cristallin friable.
- ii. Point de fusion de 113 °C.
- iii. De couleur jaune.

Parmi les propriétés précédentes, laquelle ou lesquelles (s'il y en a) seraient les mêmes pour un seul atome provenant de cet échantillon, si on parvenait à l'isoler?

RÉPONSES

Vous avez choisi

b- Aucune propriété ne serait la même.

- 1- Ce sont des propriétés physiques, mais seulement les propriétés chimiques seraient les mêmes.
- 2- Un atome ne garde aucune propriété physique ou chimique de la substance qu'il constitue.
- 3- Les propriétés sont une moyenne des propriétés particulières de chaque atome, qui ont tous des propriétés différentes dans le soufre.

Valider votre choix

Figure 11 : Saisie d'écran du deuxième palier de l'item présenté à la figure 10, lorsque le choix au premier palier est b)

Ainsi, les trois justifications présentées à la figure 11 ne s'appliquent qu'au choix b, selon lequel aucune propriété n'est conservée par l'atome. Cela laisse la possibilité de proposer des justifications différentes pour les étudiants qui auront choisi a ou c. En proposant plusieurs choix de justifications, il y a plus de chances que chaque étudiant trouve la justification qui correspond le plus exactement au raisonnement qui a fondé sa réponse.

Dans le questionnaire MPP utilisé pour cette recherche, il n'était pas possible de revenir en arrière après avoir vu les justifications proposées pour un choix au premier palier. En effet, il était important que les étudiants n'aillent pas lire toutes les justifications pour ensuite

seulement choisir une réponse au premier palier. Si un étudiant cliquait sur la flèche pour revenir en arrière dans son navigateur, une fenêtre contextuelle lui indiquait qu'il ne le pouvait pas.

La figure 11 présente les justifications pour la bonne réponse au premier palier (la réponse b). Par contre, ce ne sont pas toutes les justifications qui sont exactes, permettant ainsi de trouver des conceptions alternatives même si l'étudiant avait au départ la bonne réponse. Par exemple, la deuxième justification (b2) se base sur la conception alternative selon laquelle un atome n'a pas de propriétés chimiques en commun avec l'élément qu'il constitue et la troisième justification (b3), sur celle voulant que les atomes d'un élément aient les uns et les autres des propriétés différentes.

Le questionnaire MPP est constitué de 20 questions à choix multiples à deux paliers sur la plateforme ConSOL. Le texte des questions est présenté en Annexe E.

Chaque item comporte trois choix de réponses au premier palier, puis trois réponses au deuxième palier pour chaque choix du premier, pour un total de neuf justifications par item. Les neuf justifications ne sont pas nécessairement exclusives : en effet, la même justification peut revenir à plus d'une occasion (par exemple, le questionnaire présente la même justification en a1, en b1 et en c3 pour la question Q05).

Lors de la phase pilote, les versions comportaient chacune entre 10 et 12 questions, mais la phase principale permettait un plus grand nombre de questions, soit vingt questions à choix multiples à deux paliers, étant donné que les étudiants n'avaient pas de réponses écrites à fournir, seulement des choix de réponse à sélectionner.

Aux enseignants qui ont accepté de libérer une période en classe pour faire passer ce test à leurs étudiants, un document de consignes ainsi qu'un document d'information pour les étudiants ont été envoyés par courriel. Les consignes pour les enseignants indiquaient notamment l'adresse URL où répondre au test et comment les étudiants devaient se créer un nom d'utilisateur. Le document d'information pour les étudiants était le même que lors de la phase pilote; il expliquait les buts du projet et indiquait aux étudiants que leur participation était libre et sans contrainte. Les enseignants de chimie se sont chargés de faire photocopier le document pour les étudiants et de le distribuer à chacun avant de commencer le test. Au verso de ce document se trouvait un tableau périodique simplifié, indiquant pour chaque élément son numéro atomique, sa masse atomique et son électronégativité, en plus de son symbole chimique et de son nom.

Pour répondre au questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes », les étudiants devaient d'abord consentir implicitement à y participer⁵, puis accéder à l'adresse URL pour la passation du test⁶. Ils devaient ensuite se créer un nom d'utilisateur. Les consignes à l'enseignant précisait que le nom d'utilisateur devait commencer par un préfixe défini pour chaque cégep (par exemple, « AMOS » pour le Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue – Campus d'Amos, ou « CAL » pour le Cégep André-Laurendeau) et être constitué ensuite de n'importe quelle combinaison de caractères alphanumériques ne permettant pas d'identifier les étudiants pour préserver leur anonymat. Chaque étudiant devait ensuite répondre à un court sondage lui demandant son sexe, son âge et quels cours de chimie il ou elle avait suivis et réussis au moment de répondre au test.

4.6 Traitement et analyse des données

4.6.1 Phase préliminaire

Comme détaillé précédemment, les entrevues ont été enregistrées et transcrites. Étant donné les visées exploratoires de cette recherche, les transcriptions ont été codées selon des catégories émergent de l'analyse elle-même, utilisant un certain nombre de codes adaptés de Nicoll (2001) pour les conceptions observées à la fois dans la présente étude et dans la sienne. Enfin, l'analyse des données a été réalisée grâce un logiciel de traitement des données qualitatives, le logiciel QDA Miner (Provalis Research, n.d.).

4.6.2 Phase pilote

Cette phase de la recherche a fourni comme données brutes les questionnaires papier, sur lesquels les justifications des étudiants étaient écrites à la main. Avant de pouvoir les analyser, les 2946 justifications ont été saisies dans le logiciel Microsoft Excel, qui présentait l'avantage de permettre de manipuler une grande quantité de sujets donnant chacun, somme toute, une petite quantité de données, et de trier les résultats rapidement. La saisie de données

⁵ En accord avec le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPER) de l'Université de Montréal, un consentement implicite seulement a été demandé aux étudiants : s'ils répondaient au test, c'est qu'ils acceptaient de répondre au test.

⁶ Au moment d'écrire ces lignes, l'URL était <http://www.consolchem.org/version9>.

se faisait après que chaque groupe d'étudiants avait terminé de répondre au questionnaire, pour permettre d'analyser les données au fur et à mesure de la collecte et d'ajuster les items des questionnaires rapidement si nécessaire. L'âge et le sexe des étudiants ainsi que les cours de chimie qu'ils avaient suivis et réussis au moment de répondre au test étaient également saisis pour chacun.

Deux objectifs étaient poursuivis en procédant à l'analyse des justifications. D'une part, repérer les justifications les plus fréquentes pour chaque choix de réponse, dans le but de constituer le deuxième palier à choix multiples de l'outil qui serait utilisé lors de la phase principale de l'étude. D'autre part, étudier les processus *modèles mentaux* → *réponse* employés par les étudiants pour les situer dans l'un des quatre schémas présentés à la section 2.5.

Comme mentionné plus haut, et sur la base de l'interprétation intéressante de Furió et Calatayud (2000), des résultats trop souvent négligés dans les recherches antérieures basées sur la méthode de Treagust (1988), et pourtant potentiellement très riches, ont donc été analysés à la phase pilote pour inférer les processus menant des modèles mentaux aux réponses (processus *modèles mentaux* → *réponse*) des étudiants sondés dans le cadre de la présente. Comme la phase pilote de la recherche visait à demander à des étudiants de « raisonner sur papier » en écrivant les raisons pour lesquelles ils choisissent une réponse à une question de chimie, ces traces de raisonnement, au-delà de permettre l'établissement d'un deuxième palier basé sur des réponses naturelles, ont permis d'avoir un aperçu de la façon de penser des étudiants qui réfléchissent aux raisons qui sous-tendent leurs choix. Lorsque leurs réponses étaient suffisamment étoffées, non seulement des conceptions alternatives pouvaient apparaître, mais aussi des modes de raisonnement transparaisaient, ces modes de raisonnement dont les écrits de recherche font mention (voir notamment le chapitre 2, à la section 2.3, présentée précédemment) sans qu'ils aient toutefois été bien vérifiés par la recherche expérimentale.

Une analyse des traces des étudiants a ainsi permis de combler une partie de cette lacune de la recherche, en fournissant des observations expérimentales de processus de raisonnement pour l'instant pressentis ou, au mieux, observés chez de rares individus, dans des études exploratoires avec un petit nombre d'étudiants.

L'analyse des justifications a été réalisée en collaboration avec un assistant de recherche, à la fois étudiant de la faculté des Sciences de l'Éducation de l'Université de Montréal et enseignant de chimie au Cégep André-Laurendeau.

Le chapitre 6 « Résultats » de cette thèse présente plusieurs justifications d'étudiants. Les erreurs grammaticales et d'orthographe dans ces justifications ont été corrigées pour faciliter la lecture, sans toutefois modifier le sens de ce qui était écrit.

D'une passation à l'autre, les items étaient ajustés puis redistribués dans les versions suivantes s'ils étaient pertinents (si les étudiants montraient des conceptions alternatives, ou si les réponses infirmaient ou confirmaient des résultats de recherche antérieurs, par exemple).

4.6.3 Phase principale

4.6.3.1 Traitement des données

La plateforme ConSOL, dans son module destiné aux chercheurs et dont l'accès est verrouillé, offre une option d'exportation des données en format .csv (*Comma Separated Values*), facilement manipulable par un tableur comme Excel. Au fur et à mesure des passations, soit une cinquantaine de fois durant l'année 2012-2013, les données de tous les répondants au test ont été récupérées. Les données étaient nettoyées dans Excel, puis exportées dans le logiciel IBM SPSS (IBM Corp., 2012) pour analyses statistiques.

4.6.3.2 Variables indépendantes

Pour chaque participant à la phase principale, le sondage a recueilli l'information sur son âge, son sexe et les cours de chimie qu'il avait suivis et réussis au moment de répondre au questionnaire. En plus, le préfixe du nom d'utilisateur indiquait l'établissement d'enseignement où il était inscrit. Grâce à l'indication de l'heure à laquelle les tests se déroulaient, enregistrée automatiquement sur le serveur, il était aussi possible de classer les répondants par groupe-classe. En communiquant par courriel avec les enseignants, le cours auquel les étudiants étaient inscrits au moment de répondre au test était identifié. Enfin, grâce aux calendriers scolaires, une variable « Progression dans le programme » qui précisait à quel moment de la session le test se déroulait a été aussi créée.

4.6.3.3 Sélection des données à analyser

Sur les 2125 participants qui ont répondu au questionnaire en ligne, 1983 ont répondu à l'ensemble des 20 questions du test, ce qui représente une forme de mortalité expérimentale de 6,7 %. Afin de s'assurer que les répondants au test avaient été le plus sérieux possible, seuls les questionnaires complets ont été analysés. Il est à noter que les répondants qui n'ont pas répondu à toutes les questions du test sont répartis assez uniformément parmi les établissements d'enseignement. Les étudiants qui n'ont répondu à aucune question n'ont pas été comptés, soit parce qu'ils ont librement refusé de participer, soit parce qu'ils ne sont qu'entrés sur le site Web ConSOL sans répondre à la question 1 (ni à aucune autre question subséquente).

4.6.3.4 Variables dépendantes

Plusieurs façons d'attribuer des points aux combinaisons de choix de réponse et de justification ont été développées. Voici une description de ces variables dépendantes.

Score 1^{er} palier – La bonne réponse à la question au premier palier de chaque item vaut 1 point, les deux mauvaises réponses valent 0 point. Le **score 1^{er} palier** est la somme de ces points pour l'ensemble des questions, divisée par 20, qui est le score maximal.

Score 1^{er}/2^e palier – La combinaison « bonne réponse au premier palier » et « bonne justification au deuxième palier » vaut un point, alors que les huit autres combinaisons ne valent pas de points. Le **score 1^{er}/2^e palier** est la somme de ces points pour l'ensemble des questions, divisée par 20 (le score maximal). Bien entendu, le **score 1^{er}/2^e palier** pour un étudiant est toujours plus petit ou égal à son **score 1^{er} palier**.

Score pondéré – Pour raffiner l'analyse, un système de pointage a été développé, qui attribue aux étudiants un maximum de 5 points par item. Ce système prend en compte les bonnes réponses avec bonne justification (5 points), mais permet également de créer des distinctions entre les mauvaises réponses : en effet, certaines mauvaises réponses sont plus dramatiques que d'autres, comme le montre l'exemple suivant.

À l'item présentant deux formules de composés et demandant si ceux-ci existent sous la forme de molécules (voir la figure 12), l'étudiant pouvait choisir au premier palier entre des réponses du type « a) oui, les deux », « b) seulement le premier » ou « c) seulement le deuxième ».

Voici les formules chimiques de composés : NH_4Br et H_2SO_4 . Est-ce que les composés représentés par ces formules existent sous la forme de molécules?		
a. Oui, les deux composés sont des molécules.	b. Seul le NH_4Br est une molécule.	c. Seul le H_2SO_4 est une molécule.

Figure 12 : Énoncé de la question et choix de réponse du premier palier pour l’item « Laquelle est une molécule, formule » (Q02)

La bonne réponse étant « c) seulement le deuxième », si l’étudiant répondait « a) oui, les deux », l’erreur dénotait moins de difficulté de compréhension que s’il répondait « b) seulement la première », choisissant ainsi celle qui n’en est pas une. Les points étaient attribués de la façon suivante : 2 points pour la réponse c) (la bonne réponse), 1 point pour la réponse a) et aucun point pour la réponse b). Le même type d’analyse sur les 3 options du premier palier et les 9 justifications du deuxième palier pour les 20 items a été réalisé, afin d’ordonner le plus possible les unes par rapport aux autres les différentes combinaisons de choix de réponse. Cette grille de pointage pour le **score pondéré** est présentée dans l’Annexe E, pour chaque combinaison réponse-justification de chaque item. Elle a été ajustée à la suite de discussions avec un autre enseignant de chimie collégial jusqu’à atteindre un consensus.

Score pondéré total – Le total de tous les **scores pondérés** pour un répondant donne un score sur 100, qui a été converti en fraction en le divisant par 100.

5 Résultats

5.1 Phase préliminaire

Durant la phase préliminaire, qui s'est déroulée avant le début du projet de recherche à proprement parler et qui visait à préparer celui-ci, des entrevues ont été menées avec des étudiants du programme Sciences de la nature, 200.B0, sur plusieurs concepts de chimie. Les résultats complets de cette recherche ayant fait l'objet d'une communication antérieure (Cormier & Vázquez-Abad, 2011), ils ne seront pas entièrement repris ici. Toutefois, il est pertinent de faire ressortir quelques observations importantes qui ont permis certains choix dans l'étude actuelle.

Tout d'abord, les étudiants de première session, qui étaient en train de suivre le cours Chimie générale, 202-NYA-05, ont surtout démontré qu'ils manquaient de connaissances formelles sur les concepts visés par cette recherche (la structure des molécules, les liaisons intermoléculaires, etc.). En effet, ces notions sont enseignées à la fin du cours Chimie générale. Ils répondaient souvent qu'ils ne connaissaient pas la raison expliquant les phénomènes ou les sujets présentés, et ne montraient pas un modèle clair de la nature corpusculaire de la matière. C'est, en soi, une observation intéressante, puisque la nature corpusculaire de la matière (le fait que la matière est constituée de particules) est enseignée dès le secondaire. Mais ces étudiants ne semblaient pas s'en être construit un modèle qu'ils auraient pu invoquer dans leurs explications. Les étudiants qui n'avaient pas terminé le cours Chimie générale n'ont donc pas fait partie de la population visée par la recherche. Afin de confirmer cette exclusion, un groupe de Chimie générale a participé à la phase pilote et, effectivement, les copies qu'ils ont rendues étaient le plus souvent vierges. Selon la typologie présentée à la section 2.5, on voit que ces étudiants doivent négocier avec un processus de raisonnement du schéma C « Carence ou fragmentation » qui ne leur permet même pas de tenter une réponse, dénotant des carences très importantes sur les sujets étudiés. Un des objectifs de la recherche étant de trouver des conceptions alternatives, des étudiants au schéma C uniquement à cause de carences aussi importantes dans leurs connaissances antérieures ne constituent pas un bon échantillon pour répondre aux questions de cette recherche.

Toujours à la phase préliminaire, et pour les étudiants qui parvenaient au moins à fournir une réponse aux questions, une observation reliée à leurs modèles mentaux a été particulièrement importante pour la suite de la recherche : les explications que donnaient les étudiants pour les phénomènes discutés en entrevue étaient souvent de nature anthropomorphique. Par exemple, un étudiant a ajouté un électron sur la structure de Lewis de la molécule de monoxyde d'azote pour créer une paire avec l'électron naturellement non apparié de cette molécule et a justifié cet ajout en disant : « Parce que je trouvais qu'il faisait triste [sic]. » Un autre étudiant, à qui a été demandé pourquoi les atomes se lient entre eux dans une liaison chimique, a répondu : « Ils sont bien entre eux, le Cl_2 obéirait à la règle de l'octet, alors il serait tranquille. » Au lieu d'expliquer les phénomènes par des principes chimiques ou physiques, ces étudiants avaient tendance, arrivés au bout de leurs explications, à recourir à des analogies anthropomorphiques ou téléologiques. Ce type de processus laisse entrevoir une carence ou fragmentation des connaissances antérieures des étudiants. Ils donnaient parfois une réponse correcte à la question posée, parfois une mauvaise réponse, mais ils ne parvenaient pas à les expliquer.

Par ailleurs, un « duo » de conceptions alternatives concernant la prédiction de la forme des molécules a été observé, une première fois lors de l'étude préliminaire, puis de nouveau dans les deux autres phases de l'étude. On sait que c'est la répulsion des paires d'électrons autour de chaque atome central qui détermine la forme d'une molécule. Les paires libres (les doublets libres) et les paires liantes (les liaisons) se repoussent toutes entre elles, parce que ce sont des électrons, donc ils ont la même polarité (négative). Comme on l'a vu précédemment à l'Annexe A « Notions de chimie », cette théorie de la géométrie moléculaire s'appelle la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV). Les deux mauvaises réponses reliées à cette théorie sont constituées chacune de la moitié du raisonnement nécessaire à l'application de cette théorie. En effet, certains étudiants croient que ce ne sont que les paires d'électrons libres qui se repoussent alors que d'autres croient que ce ne sont que les paires liantes. Ces deux raisonnements, chacun à moitié exact, ont grandement inspiré le sujet de la recherche présentée ici et la typologie des erreurs de raisonnement que présentera la section suivante.

On remarque que ces deux raisonnements à demi exacts relèvent aussi du schéma C « Carence ou fragmentation » du processus *modèles mentaux* → *réponse*. En effet, ne pouvoir invoquer qu'une partie des concepts nécessaires à faire une prédiction juste est précisément la

définition de la fragmentation des connaissances antérieures. Les deux moitiés du raisonnement ont été enseignées en même temps, mais dans une certaine situation, les étudiants n'en invoquent qu'une seule, ne pouvant pas récupérer l'autre. Au contraire des étudiants qui n'arrivent pas à donner une réponse, ceux qui se trompent parce qu'ils n'ont que la moitié de la solution en tête constituent une population aux problèmes différents. Ils sont à la fois plus proches de la bonne réponse, tout en ne comprenant peut-être pas l'obstacle qui se dresse entre eux et cette bonne réponse, parce qu'ils basent leur jugement sur une connaissance antérieure qu'ils savent exacte (ils ne savent toutefois pas qu'elle est incomplète). Il sera question de ces « demi-raisonnements » et d'autres modes de raisonnement à la section suivante, sur les résultats de la phase pilote, qui a poursuivi l'investigation en ce sens.

En cherchant des conceptions alternatives sur la géométrie moléculaire ainsi que des modes de raisonnement permettant de classer celles-ci, de très nombreuses conceptions ont été trouvées, dont il sera question immédiatement. Pour illustrer quelques points particuliers, certains autres résultats de la phase préliminaire seront présentés au fil de la section suivante.

5.2 Phase pilote

Comme il a été expliqué dans la méthodologie, pour cette phase le questionnaire à deux paliers (pour chaque question, choix multiples et justification ouverte) a été utilisé. Dans cette section, les résultats du premier palier seront d'abord présentés, puis un aperçu de la combinaison réponse-justification pour certains items suivra. Enfin, la typologie des erreurs de raisonnement développée sur la base de ces justifications terminera la section.

5.2.1 Taux de succès au premier palier

Au premier palier, le taux de succès moyen était de 40,0 % (écart-type : 17,6 %), ce qui, bien que faible, se compare à ce que rapportent des études similaires (Furió & Calatayud, 1996; Othman et coll., 2008; Peterson et coll., 1989; Tan et coll., 2002). Le tableau VI présente la moyenne du score au premier palier pour cinq groupes d'étudiants, répartis selon la progression dans leurs études au moment de répondre au test.

Tableau VI : Moyenne au premier palier du test à choix multiples et justifications ouvertes, selon la progression dans leurs études

Étudiants inscrits...	Moyenne au 1er palier	N	Écart-type
Total	40,0 %	277	17,6 %
Au cours Chimie générale	34,6 %	28	15,3 %
Au cours Chimie des solutions	42,4 %	129	16,0 %
En 2 ^e année, cégep en Sciences	35,3 %	87	17,9 %
En 1 ^{re} année, baccalauréat chimie	55,1 %	21	21,1 %
En 2 ^e année, baccalauréat enseignement des sciences	33,5 %	12	12,3 %

On peut comprendre ce faible taux de succès, parce que les items employés dans cette étude ne sont pas destinés à mesurer l'apprentissage ou l'habileté des étudiants : ils ont été pensés pour faire sortir des réponses incorrectes fréquentes qui étaient déjà suspectées, car les questions sont basées sur les écrits de recherche antérieurs.

Seule la moyenne au premier palier des étudiants en première année au baccalauréat en chimie se distingue significativement celle des autres étudiants ($F = 7,734$, $N = 277$, $p < 0,05$). En effet, un test post-hoc de Waller-Duncan montre que seul le sous-ensemble constitué des étudiants du baccalauréat en chimie se distingue du sous-ensemble de tous les autres étudiants ayant participé à cette phase de la recherche (sous-ensembles pour seuil $\alpha = 0,05$). La taille d'effet, mesurée par le r de Cohen, est de $r = 0,31$, ce qui est un effet de taille moyenne. Les étudiants du baccalauréat en chimie semblent donc meilleurs pour répondre à des questions conceptuelles sur ces sujets de chimie que ceux des autres catégories sondées.

Sur la base de ces données, il est troublant de constater que le score moyen des étudiants de deuxième année du baccalauréat en enseignement des sciences et technologies au secondaire n'est pas différent de celui des étudiants de cégep. Ces enseignants de demain qui répondent incorrectement à des questions conceptuelles en chimie ont probablement des conceptions alternatives, des manques de connaissances ou des problèmes de raisonnement logique au même titre que les étudiants de niveau collégial. Ces difficultés conceptuelles risquent de surgir lorsque ces futurs enseignants commenceront leur pratique. Plusieurs recherches ont d'ailleurs montré que les enseignants ou les futurs enseignants de science ont des conceptions alternatives semblables à celles de leurs élèves (Banerjee, 1991; Blanco & Niaz, 1998; Çalik & Ayas, 2005; Chang, 1999; Haidar, 1997; Taber & Tan, 2011).

5.2.2 Justifications au deuxième palier

L'analyse des justifications données par les étudiants au deuxième palier a été réalisée, à la fois pour les bonnes et pour les mauvaises réponses du premier palier. Cela a permis de produire l'énoncé de la conception alternative qui peut être associée à chaque justification, ou alors de pointer le manque de connaissance (ou sa fragmentation) de l'étudiant ou l'erreur dans l'agencement des concepts qu'il a commise. Il est impossible de présenter ici tous les résultats, puisque près de 3000 justifications ont été obtenues. Voici toutefois quelques résultats sélectionnés pour illustrer le processus suivi durant cette phase.

5.2.2.1 Quelques justifications d'étudiants : la forme de la molécule

La forme de la molécule, un concept central dans la présente recherche, faisait l'objet de 12 items. La figure 13 donne l'énoncé et les choix de réponse pour deux de ces items. La bonne réponse est identifiée par un astérisque.

1. Parmi les molécules suivantes, laquelle a une structure linéaire?

* a. $\text{N}\equiv\text{C}-\text{H}$ b. $\text{Cl}-\text{Sn}-\text{Cl}$ c. $\text{Cl}-\text{S}-\text{Cl}$

Expliquez votre réponse.

2. Qu'est-ce qui cause la molécule d'eau, H_2O , à adopter la forme géométrique qu'elle adopte?

a. L'électronégativité élevée de l'oxygène.
b. Le fait que les liaisons O-H sont polaires.
*c. À cause de la répulsion entre des charges de même polarité.
d. Parce que cette molécule peut faire des liaisons hydrogène.

Expliquez votre réponse.

Figure 13 : Deux items sur la géométrie moléculaire développés lors de la phase pilote de la recherche

Le taux de succès au premier palier pour ces deux questions était respectivement de 58,8 % et de 44,7 %, nettement au-dessus de la moyenne pour l'ensemble des questions. Malgré tout, il a été décelé chez certains étudiants la présence de conceptions alternatives sur des sujets reliés à la géométrie moléculaire. Le tableau VII présente des exemples de justifications d'étudiants (identifiés par leur numéro de sujet) pour ces questions et des conceptions alternatives associées.

Tableau VII : Réponses et justifications d'étudiants au sujet de la forme des molécules et cause de leur mauvaise réponse ou mauvaise justification

Réponse 1 ^{er} palier	Exemple de justifications d'étudiants	Analyse didactique de la difficulté conceptuelle	Cause de la mauvaise réponse / justification ^a
1. c. SCl ₂	« Étant donné les doublets d'électrons libres placés symétriquement, les Cl ne sont pas repoussés ou attirés dans un sens en particulier. » (sujet 129) « Parce que sa formule est symétrique. » (sujet 115)	Une molécule symétrique est linéaire.	Fragmentation
1. c. SCl ₂	« Cette molécule n'est pas polaire. » (sujet 171) « À cause des angles entre S et Cl = 180° et les vecteurs s'annulent. » (sujet 68)	La polarité de la molécule explique sa forme.	Conception alternative
1. * a. HCN	« La liaison triple oriente la molécule dans un plan (pas de rotation rapide) [...]. » (sujet 97) « Les autres choix ont plusieurs doublets d'électrons autour d'eux alors que le a) a une liaison triple qui n'est pas flexible et un seul doublet libre sur le N, alors la géométrie est linéaire. » (sujet 40)	La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide.	Conception alternative
2. d. [...] liaisons hydrogène	« Présence de ponts hydrogène qui sont de fortes liaisons qui orientent à 104,5 les atomes d'hydrogène. » (sujet 97) « À cause des liaisons hydrogène que cette molécule veut faire [...], elle se place d'une façon à attirer les bonnes charges aux bons endroits. » (sujet 70)	Les liaisons hydrogène donnent la forme à la molécule.	Conception alternative
2. * c. [...] répulsion [...].	« Les 2 électrons libres de l'oxygène exercent une force de répulsion entre eux puisqu'ils sont de même charge. Cela a pour effet de rapprocher les 2 doublets liés aux hydrogènes. » (sujet 151) « Son doublet libre lui confère un angle de 120°. » (sujet 26)	La géométrie moléculaire est causée par la répulsion entre les doublets libres.	Fragmentation
2. * c. [...] répulsion [...].	« Je pense que les H ont la même charge de polarité donc ils se repoussent. » (sujet 76) « Car les 2 H vont se repousser. [...] » (sujet 176)	La géométrie moléculaire est causée par la répulsion entre les atomes périphériques.	Fragmentation

^a Ces causes reprennent celles proposées à la section 2.5 dans les processus *modèles mentaux* → *réponse*.

Ces deux questions sont semblables puisque pour y répondre, les étudiants devaient appliquer la théorie de la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV). Pour la question 1, les étudiants n'avaient qu'à appliquer la théorie puisque les électrons étaient représentés dans les structures de Lewis⁷ des choix de réponse. Pour la question 2, les étudiants devaient en plus s'imaginer la structure de Lewis de la molécule d'eau, qui n'était pas donnée dans la question.

En faisant l'analyse didactique des justifications fournies par les étudiants, il est apparu que les combinaisons réponse-justification se plaçaient dans l'une des trois catégories suivantes :

- i. Certains étudiants donnent la bonne réponse et la justifient correctement, en employant le processus *modèles mentaux* → *réponse* appelé plus tôt le schéma A « Mène à une bonne réponse »;
- ii. Certains donnent la mauvaise réponse et rédigent une justification erronée au regard de la théorie scientifique, en utilisant un processus du schéma B (conceptions alternatives), C (carence/fragmentation) ou D (agencement incorrect);
- iii. Enfin, d'autres donnent la *bonne* réponse avec toutefois une justification qui ne respecte pas la théorie scientifique, ou ne la respecte pas entièrement, soit à cause d'une conception alternative, de carence ou fragmentation dans leurs connaissances ou d'un agencement incorrect de concepts.

Ce troisième cas est particulièrement intéressant. Dans une question à choix multiples, il est en effet possible qu'une certaine proportion d'étudiants choisisse par hasard la bonne option. Si on se contente de poser uniquement la question au premier palier, on ne peut distinguer sur ce seul choix les étudiants qui sont au schéma C (carence ou fragmentation) de ceux qui sont au schéma B (présence de conceptions alternatives) ou au schéma D (agencements incorrects). Les justifications ont donc permis de déceler des conceptions alternatives et des erreurs logiques même chez les étudiants qui donnaient une bonne réponse, et de confirmer les obstacles de carence ou de fragmentation chez ceux pour qui le problème était de cet ordre.

⁷ Ce sont en réalité des structures intermédiaires entre les représentations de Lewis et celles de Crum Brown (qui montrent les liaisons par des traits).

Si on revient au tableau VII, on voit, à la première et aux deux dernières lignes, que les étudiants peuvent avoir des connaissances fragmentées les menant à donner une mauvaise réponse ou une mauvaise justification après avoir choisi une bonne réponse. Dans le premier cas, plusieurs facteurs ont été négligés pour choisir la molécule linéaire. La mauvaise réponse a été choisie à la suite d'une simplification abusive de la situation présentée dans la question. Aux deux dernières lignes du tableau, les étudiants ont effectivement choisi le bon facteur au premier palier, mais l'ont expliqué de façon incomplète. Ce cas de raisonnement à demi exact témoigne probablement d'une moins grande difficulté d'apprentissage que le raisonnement ayant négligé plusieurs facteurs dans une simplification abusive, ou celui complètement inexact, basé sur une conception alternative, comme aux autres lignes du tableau VII. D'autres « simplifications abusives » et « demi-raisonnements » ont été observés durant la recherche. Ces sous-catégories du schéma C « Carence ou fragmentation » du processus *modèles mentaux* → *réponse* seront reprises dans la typologie complète, présentée au tableau IX à la page 126.

Le tableau VII présente aussi trois conceptions alternatives. Deux d'entre elles sont inédites dans les écrits de recherche (« La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide » et « Les liaisons hydrogène donnent la forme à la molécule »), alors que l'autre (« La polarité de la molécule explique sa forme ») avait déjà été répertoriée (Peterson et coll., 1986). Ces conceptions alternatives sont différentes de carences ou de fragmentations : elles montrent une construction personnelle, mais inexacte, des concepts scientifiques dans l'esprit des étudiants. Mais elles ne sont pas toutes les trois exactement du même ordre. Voici une analyse plus fine de ces trois premières conceptions alternatives.

La première, « La polarité de la molécule explique sa forme », fait sourciller l'expert qui en prend conscience : ce n'est pas la polarité qui explique la forme, c'est plutôt l'inverse ! En effet, la polarité d'une molécule est due, d'une part, par sa forme et d'autre part par la polarité de ses liaisons. Mais en aucun cas, la polarité d'une molécule ne peut expliquer sa forme⁸. Cette conception alternative est due à l'établissement incorrect de la relation entre les deux

⁸ À strictement parler, la structure tertiaire et quaternaire des protéines est effectivement due à leur polarité, et surtout à leur propension à faire ou non des ponts H avec le milieu biologique. Toutefois, dans les cas étudiés ici, les molécules sont très petites (ce ne sont pas des protéines) et on parle simplement de la géométrie causée par répulsion des paires d'électrons de valence autour d'un ou de quelques atomes centraux, qui n'est pas due à la polarité.

partenaires. Bien que ça puisse sembler un problème de logique de base, cette conception alternative témoigne plutôt d'une construction incorrecte de l'identité des concepts mis en relation : c'est bien une conception alternative. La troisième conception alternative du tableau VII est du même ordre : « Les liaisons hydrogène donnent la forme à la molécule » est aussi une conception de la catégorie de la connexion (car c'est la forme de la molécule qui oriente les liaisons hydrogène qu'elle formera avec ses voisines).

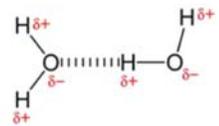
La seconde conception alternative, « La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide », est si près de la théorie scientifique qu'elle pourrait presque passer inaperçue : la liaison triple est effectivement rigide, une molécule qui a une liaison triple est effectivement linéaire... mais l'un n'est pas la cause de l'autre. Ces deux propriétés existent en parallèle. La liaison triple est rigide parce que les liaisons multiples (doubles ou triples) empêchent la rotation libre autour de l'axe entre les deux noyaux liés. D'un autre côté, les atomes liés par liaison triple sont habituellement hybridés sp , et entourés de deux paquets d'électrons. Deux paquets se repoussent toujours à 180° , ce qui donne une géométrie linéaire à la molécule. Mais ce que le sujet 97 disait : « La liaison triple oriente la molécule dans un plan (pas de rotation rapide) [...] » est inexact, parce que le fait que la rotation est empêchée n'est pas la cause de la linéarité : en effet, les liaisons doubles empêchent la rotation aussi, mais les molécules qui ont des liaisons doubles ne sont pas linéaires. Faire le lien entre rotation empêchée et linéarité de la molécule revient à associer deux concepts non reliés par relation causale. Ce genre de conception alternative sera désormais classifié comme un problème de connexion (entre concepts qui sont, dans les faits, non reliés par relation causale).

Ce type de conception alternative, nommé la « connexion », sera aussi repris dans la typologie complète (tableau IX à la page 126).

5.2.2.2 Quelques justifications d'étudiants : les liaisons intermoléculaires

Dans cette recherche, la liaison intermoléculaire a aussi posé problème aux étudiants. Voici en exemple deux items portant sur ce sujet.

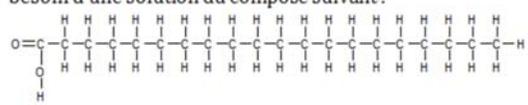
10. Quel énoncé décrit le plus précisément ce que représente le trait pointillé dans la figure ci-dessous?



a. Une liaison covalente polaire.
 b. Une liaison intermoléculaire.
 c. Une liaison ionique.
 d. Une force électrostatique.

Expliquez votre réponse.

12. Vous souhaitez faire une expérience durant laquelle vous aurez besoin d'une solution du composé suivant :



Qu'utiliserez-vous comme solvant?

a. De l'eau, H_2O b. De l'éthanol, CH_3CH_2OH
 c. De l'hexane, $CH_3(CH_2)_4CH_3$ d. La même molécule que le composé.

Expliquez votre réponse.

Figure 14 : Deux items à deux paliers sur les liaisons intermoléculaires développés dans le cadre de cette étude

La question de gauche (qui était la question 10 de l'une des versions du questionnaire) concerne directement la définition d'une liaison intermoléculaire, alors que la question de droite (la question 12 d'une autre version) demande plutôt d'appliquer la notion de liaison intermoléculaire pour prédire un phénomène macroscopique.

Le taux de succès au premier palier pour chacune était de 41,4 % pour la question 10 et de seulement 4,2 % pour la question 12.

La question 12 est un peu ambiguë – elle a d'ailleurs été retirée de l'outil pour la phase principale – parce que deux réponses peuvent être acceptables : l'éthanol et l'hexane dissolvent en effet l'acide eicosanoïque (le soluté dans l'énoncé de la question) à faible concentration, car il est soluble dans l'hexane et un peu soluble dans l'éthanol (HCP, 2013). Si on considère l'éthanol et l'hexane comme de bonnes réponses, le taux de succès passe soudain à 45,8 %. N'empêche que certaines justifications d'étudiants pour l'éthanol sont empreintes d'erreurs de raisonnement. Le tableau VIII présente les conceptions alternatives et erreurs dans le processus de raisonnement pour ces deux items.

Tableau VIII : Réponses et justifications d'étudiants au sujet de la forme des molécules et cause de leur mauvaise réponse ou mauvaise justification

Réponse 1 ^{er} palier (mot-clé)	Exemples de justifications d'étudiants	Analyse didactique de la difficulté conceptuelle	Cause de la mauvaise réponse / justification ^a
10 a) (covalente)	« La liaison est polaire (différence d'électronégativité de 1,4) et covalente (≠ métaux). » (sujet 66)	Toute liaison entre deux atomes non métalliques est covalente.	Fragmentation
10 a) (covalente)	« L'oxygène électronégatif attire l'hydrogène (+). Il y a partage d'un des doublets libres de l'hydrogène. » (sujet 97)	Tout partage d'électrons est une liaison covalente.	Fragmentation
10 c) (ionique)	« Je crois que c'est ionique, car c'est encore une fois à cause des charges δ^+ et δ^- que les 2 molécules vont se lier, mais j'hésite à dire que c'est une liaison intermoléculaire. » (sujet 176)	Toute liaison entre des charges est ionique.	Fragmentation
12 a) (Eau)	« Parce que c'est avec de l'eau qu'on détermine si un composé est soluble ou non. » (sujet 210) « L'eau est une molécule polaire, elle est réputée pour ses propriétés de solubilisation. » (sujet 209)	L'eau est un bon solvant pour tout soluté.	Fragmentation
12 b) (Éthanol)	« J'ai choisi l'éthanol pour qu'il puisse faire une estérification donc ça le rend soluble [...]. » (sujet 203)	La mise en solution implique une réaction chimique.	Conception alternative

^a Ces causes reprennent celles proposées à la section 2.5 dans les processus *modèles mentaux* → *réponse*.

Ces deux items sont une bonne illustration de la catégorie de fragmentation des connaissances qui sera désormais nommée « simplification abusive », dans la typologie complète présentée au tableau IX à la page 126. En effet, les quatre premières causes identifiées aux justifications incorrectes sont des simplifications abusives. Ce sont des simplifications abusives parce que le raisonnement des étudiants dans ces cas repose sur une représentation de la situation conceptuelle beaucoup plus simple qu'elle ne l'est en réalité. Par exemple, c'est vrai que les liaisons covalentes sont faites (habituellement) entre deux non-métaux, mais les liaisons hydrogène sont entre deux non-métaux aussi, mais ne sont pas covalentes : ce sont des liaisons intermoléculaires. La situation est simplifiée, les catégories de liaisons sont réduites aux cas de base (liaison ionique et liaison covalente), sans considération pour les autres types de liaisons. La simplification abusive ressemble au demi-raisonnement, ces deux causes d'erreurs sont d'ailleurs dans le même modèle du processus *modèles mentaux* → *réponse*, au niveau de la

fragmentation. Le demi-raisonnement ne considère que la moitié des facteurs; la simplification abusive en considère seulement un et la situation devient excessivement simplifiée.

On remarque que la simplification abusive n'est pas toujours sur le même sujet, mais que c'est une erreur de raisonnement qui porte les étudiants à mettre trop de choses « dans le même sac », ce qui est dénoté par le mot « tout, toute » dans l'énoncé de l'analyse didactique de leurs justifications.

En plus de ces quatre simplifications abusives, classées en tant qu'obstacles de fragmentation, une conception alternative a aussi été répertoriée. Il s'agit de la conception alternative « La mise en solution implique une réaction chimique. » Cette conception alternative est importante pour la suite de la recherche, car elle s'est avérée répandue dans l'échantillon. Il en sera donc encore question plus tard, à la section 5.3.2.6 « Difficultés conceptuelles sur la solubilité et la mise en solution ».

5.2.2.3 Quelques justifications d'étudiants : le changement de phase

En plus de cette conception à propos de la mise en solution, d'autres conceptions émergent de justifications saisissantes. Elles seront brièvement présentées ici.

Dans une question, on demandait de choisir parmi trois composés, dont on donnait la formule moléculaire, celui qui aurait la température d'ébullition la plus élevée. Pour répondre à cette question, les étudiants devaient invoquer de nombreux concepts; ainsi, ce genre de question faisait partie des items les plus complexes testés lors de cette phase. Les quatre choix de réponses étaient le méthoxyméthane, CH_3OCH_3 , le formaldéhyde, CH_2O , le tétrafluorure de carbone, CF_4 , et le méthanol, CH_3OH . La bonne réponse est le méthanol, dont les molécules peuvent faire des ponts H entre elles, augmentant ainsi l'énergie nécessaire pour faire passer le liquide en phase vapeur, ce qui se traduit par une température d'ébullition plus élevée. Des étudiants ont pourtant choisi le CF_4 , celle qui a la température d'ébullition la moins élevée, en justifiant ainsi :

C'est une molécule non polaire ayant une petite chaîne de carbone. Elle est donc beaucoup plus stable. Il faut une très grande température pour la faire bouillir. (sujet 230)

Car ce composé forme 5 ions et il y a donc 4 liaisons entre ceux-ci. Il faut donc beaucoup d'énergie pour briser. (sujet 223)

Car ce sont des covalents et le F forme des liens difficiles à briser. (sujet 231)

Les liaisons entre les différents constituants de ce composé sont plus difficiles à briser. (sujet 270)

Il est manifeste, par ces justifications, que les étudiants croient que les liaisons covalentes se brisent lors du passage en phase vapeur. Pour les autres choix de réponse, on observe aussi de telles justifications.

Un autre item prêtait flanc à cette conception alternative. Là encore, plusieurs étudiants justifiaient leurs réponses en ce sens. Dans une de ces questions, on demandait pourquoi l'éthanol avait une température d'ébullition plus élevée que le méthanol. Près de la moitié des étudiants qui ont répondu à la question (39 sur 84) ont justifié leur réponse, bonne ou mauvaise, en parlant du bris des liaisons covalentes des molécules. Voici quelques exemples de justifications, représentatifs de chaque catégorie d'étudiants ayant répondu au test :

L'éthanol a un point d'ébullition plus haut que le méthanol puisqu'il y a plus de liens à défaire dans cette molécule lorsqu'elle est chauffée. Il faut donc plus d'énergie pour la défaire. (sujet 137, étudiante de chimie des solutions)

Il faut une plus grande énergie pour briser les liaisons de la molécule. (sujet 59, étudiante de chimie organique)

Dans la molécule de méthanol, il existe beaucoup moins de liaisons que dans la molécule d'éthanol (voir dessins). [schémas : structures développées, montrant les liaisons covalentes] (sujet 88, étudiant du cours optionnel de 4^e session en chimie)

Plus d'énergie est nécessaire pour briser toutes les liaisons de l'éthanol (il y en a plus) on doit donc chauffer plus, ça crée une différence. (sujet 111, étudiant au baccalauréat en chimie)

Plus il y a de liaisons, plus il est difficile de séparer les liens donc plus la température devra être haute pour briser les liens. (sujet 125, étudiante au baccalauréat en enseignement des sciences)

Il semble que cette conception alternative soit une des plus prévalentes dans la population étudiée. Il y sera d'ailleurs fait allusion dans les résultats de la phase principale de la recherche, qui a confirmé cette impression.

Cette phase de la recherche visait deux objectifs : recueillir plusieurs justifications d'étudiants pour constituer le questionnaire à deux paliers à choix multiples qui serait utilisé lors de la phase principale de l'étude, et étudier ces justifications pour trouver les façons de raisonner des étudiants qui peuvent expliquer les raisons les menant à donner des réponses ou de justifications qui ne concordent pas avec la théorie scientifique. Plusieurs réponses témoignent de conceptions alternatives dans l'esprit des étudiants, soit des représentations stables et apparemment logiques pour les étudiants qui les détiennent. Toutefois, on voit que d'autres causes peuvent mener les étudiants à donner des réponses incorrectes à des questions conceptuelles de chimie : une carence ou une fragmentation des connaissances antérieures peuvent aussi expliquer ces réponses incorrectes. De plus, des erreurs logiques dans l'agencement de concepts, dont il a été question en tant que schéma D du processus *modèles mentaux* → *réponse*, peuvent aussi mener à de mauvaises réponses. Le lecteur attentif aura remarqué qu'il n'en a pas encore été question; la section suivante, toutefois, qui présente la typologie complète des causes expliquant des réponses ou justifications incorrectes, montrera dans quelles circonstances les erreurs logiques mènent à de telles réponses incorrectes.

5.2.3 Typologie des causes menant des modèles mentaux aux mauvaises réponses

Parmi les différentes causes dégagées des justifications, certaines relevaient d'une erreur factuelle, d'autres, d'un raisonnement fallacieux, d'autres encore, d'idées naïves. Si les mauvaises réponses à des questions conceptuelles ont différentes causes cognitives, il semble avantageux de les classer selon ces causes probables pour éventuellement les traiter par des dispositifs différenciés. Comme mentionné précédemment, il n'existe pas actuellement de typologie satisfaisante pour les conceptions en chimie au postsecondaire. En effet, les rares

typologies existantes considèrent le niveau de certitude des chercheurs sur l'existence des conceptions (Grayson, Anderson, & Crossley, 2001) ou le degré d'exactitude d'une réponse partiellement correcte (García Franco & Taber, 2009). Une typologie fructueuse pour les erreurs de raisonnement est le modèle du *Commonsense Reasoning* de Talanquer (2006, 2009), mais qui ne s'applique pas à toutes les erreurs relevées dans la présente recherche. Aucune typologie ne considère cependant à la fois les erreurs logiques, les conceptions alternatives, la fragmentation des connaissances et le manque de connaissances. Comme toutes ces causes mènent à de mauvaises réponses à des questions conceptuelles, elles devraient toutes être considérées dans l'enseignement. La recherche a jusqu'à présent fait peu de distinction entre les conceptions alternatives et les autres causes de mauvaises réponses. La typologie présentée dans le tableau IX propose, à la lumière des résultats expérimentaux de la présente recherche, d'exprimer la différence entre ces causes.

On y trouve quatre conceptions alternatives (des idées en désaccord avec la théorie scientifique), deux obstacles de fragmentation (des idées correctes, mais incomplètes ou mal organisées), un obstacle de carence (des « trous » dans les connaissances) et un agencement incorrect de concepts (un raisonnement incorrect parce que contrevenant à l'expression de la logique). Cette typologie est basée sur les résultats de la phase pilote de l'étude et n'est probablement pas complète, notamment parce que ce ne sont pas tous les concepts de chimie qui faisaient partie de la présente recherche. Elle repose toutefois sur une base empirique et une analyse didactique qui en assurent, sinon l'exhaustivité, du moins la rigueur.

Cette typologie pourrait permettre d'envisager un traitement pédagogique différencié qui prendrait en considération les différences manifestes entre des conceptions variées (Cormier, 2012, 2013). Chaque type est ensuite illustré dans les sous-sections qui suivent.

Tableau IX : Typologie des causes menant des modèles mentaux aux mauvaises réponses et de leurs catégories et définitions

Cause de la mauvaise réponse / justification	Catégorie	Abréviation	Définition
Conception alternative	Physique vu comme chimique	CA-PcomC	Description d'un changement physique comme s'il s'agissait d'une réaction chimique.
	Explication corpusculaire tautologique	CA-ECT	Transposition des propriétés macroscopiques aux particules sous-microscopiques.
	Connexion	CA-Conn	Invocation d'une relation qui n'existe pas entre deux concepts.
	Importance des facteurs	CA-ImpFac	Attribution d'une importance relative incorrecte aux facteurs permettant la prédiction de phénomène.
Fragmentation	Demi-raisonnement	Fr-DR	Utilisation d'une partie seulement des critères essentiels à une prédiction correcte.
	Simplification abusive	Fr-SA	Omission de considérer des facteurs importants.
Carence	Absence de connaissance	Carence	Absence de réponse ou erreur factuelle.
Agencement incorrect	Argument opposé	Ag-ArgOpp	Raisonnement qui pointe vers l'exact opposé de la réponse donnée.

5.2.3.1 Conception alternative : le cas « physique vu comme chimique »

Cette conception alternative est probablement la plus nuisible à l'apprentissage de la chimie. Les étudiants qui la manifestaient croyaient que les molécules se brisent lors de changements physiques comme les changements de phase. Certains extraits ont d'ailleurs déjà été présentés précédemment, à la section 5.2.2.3. En voici quelques autres.

À la question « qu'est-ce qui explique la différence de température d'ébullition entre le méthanol et l'éthanol », des étudiants répondaient ainsi :

L'éthanol a une température d'ébullition plus élevée, car deux carbones sont liés entre eux, ce qui augmente la quantité d'énergie nécessaire pour la vaporisation. (sujet 105)

Il y a beaucoup de liens à briser à l'intérieur de la molécule d'éthanol. (sujet 140)

*Plus il y a de liens à briser, plus d'énergie (température) ça prend.
Éthanol a plus de liens à briser — méthanol : 3 C-H, 1 O-H (4 liens); éthanol :
5 C-H, 1 O-H (6 liens). (sujet 187)*

Ces réponses sont rapportées ici parce qu'elles sont sans équivoque : les étudiants qui les ont écrites croyaient réellement que les liaisons covalentes étaient brisées lors du passage en phase vapeur. Plusieurs autres réponses allaient en ce sens, mais laissaient place à une certaine interprétation, comme celle-ci :

*L'éthanol a une température plus élevée, car il y a plus de liens à briser.
Il faut donc donner plus d'énergie à l'éthanol afin qu'il soit en ébullition.
(sujet 83)*

Cette étudiante voulait peut-être dire qu'il y a plus de liaisons intermoléculaires à briser entre les molécules d'éthanol qu'entre les molécules de méthanol. Afin de parer à toute interprétation du genre, cette question a aussi été posée lors de la phase principale de cette étude; ces résultats seront présentés plus loin.

Lorsqu'on inclut les réponses ambiguës, la majorité des étudiants semblaient raisonner de cette manière. C'est un résultat troublant étant donné l'impact négatif que peut avoir cette conception alternative sur l'apprentissage de la réactivité chimique. Il est aussi assez surprenant de voir jusqu'à quel point elle est répandue, même si on enseigne le changement de phase aux étudiants depuis le secondaire.

Dans la même catégorie de conceptions alternatives selon lesquelles le physique est vu comme chimique, certains étudiants expliquaient le passage en solution d'un composé moléculaire par la formation de liaisons covalentes entre le soluté et le solvant. Pour expliquer la solubilité de l'éthanol dans l'eau, certains étudiants invoquaient que :

*Les 2 molécules sont des non-métaux et elles doivent alors être liées par
des liaisons covalentes. (sujet 35)*

*Les liaisons sont covalentes étant donné la différence de polarité des deux
molécules. (sujet 129)*

Les doublets libres vont être comblés par des électrons partagés entre l'eau et l'éthanol, car l'oxygène de l'eau a plusieurs doublets libres. (sujet 134)

Ces réponses montrent une difficulté à distinguer liaisons intramoléculaires et intermoléculaires. La section de cette thèse concernant la phase principale de la recherche (la section 5.3, à partir de la page 145) se penchera plus longuement sur les conceptions alternatives autour de ce sujet.

Cette façon de raisonner est peut-être reliée à ce que Talanquer (2006) nomme le *Mental Set*, c'est-à-dire comment les étudiants dans une classe de chimie ne peuvent pas raisonner avec les outils cognitifs qu'ils ont pourtant étudiés dans leurs cours d'autres disciplines. Ainsi, lorsqu'ils font les erreurs de raisonnement de la catégorie « Physique vu comme chimique », les étudiants ne pourraient pas concevoir que certains changements à la matière ne sont pas des réactions chimiques, puisqu'ils sont abordés dans un cours de chimie. Évidemment, en chimie, on étudie surtout des réactions chimiques; mais les comportements de la matière, que celle-ci soit en train de réagir ou non, font partie du champ d'étude de la chimie.

5.2.3.2 Conception alternative : l'explication corpusculaire tautologique

Une difficulté particulière à la chimie est la différence épistémologique entre le monde macroscopique et le monde des particules constituant la matière (atomes, molécules...). Les chimistes comprennent le lien entre ces deux mondes, mais les étudiants confondent souvent les deux domaines. Une des conceptions alternatives fréquentes à propos de la transition du sous-microscopique au macroscopique est la transposition de propriétés propres à un domaine aux objets de l'autre. Dans la présente étude une telle conception, nommée l'« explication corpusculaire tautologique » par Taber (2001a) et la « contrainte cognitive de l'héritage » par Talanquer dans son modèle du raisonnement par heuristiques en chimie (2006, 2009) a été observée. Ainsi, les étudiants peuvent transposer aux particules des propriétés macroscopiques comme la couleur, la conductivité, la température de fusion, l'état, etc.

Pour justifier la différence entre l'eau liquide et l'eau solide (la glace), certains étudiants invoquaient des différences dans les molécules d'eau elles-mêmes.

Car après une certaine baisse de température, les molécules d'eau perdent de leur flexibilité. (sujet 269)

Car dans le solide les molécules sont plus dures. (sujet 274)

Cette conception alternative, très naïve, a surtout été observée chez des étudiants au début de leurs études collégiales. Mais même une étudiante inscrite au cours Chimie organique (donc en deuxième année de cégep) a donné une réponse assez surprenante à une question qui demandait d'expliquer la structure régulière d'un flocon de neige :

Car la forme représente la structure « normale » de la molécule du flocon de neige, avec un atome central et 6 liaisons. (sujet 28)

Il semble que cette étudiante imaginait que les flocons de neige n'étaient pas composés de molécules d'eau, mais de « molécules de neige », ayant comme propriété la forme hexagonale typique du flocon. La molécule était ici assimilée à une toute petite portion de la matière, ayant exactement l'apparence de la matière dans le domaine macroscopique du savoir.

Bien que cette conception alternative soit assez marginale, elle a également été observée lors des entrevues de la phase préliminaire de cette étude. Voici un extrait de cette entrevue.

Intervieweur : Donc si tu voyais un atome d'argon, qu'est-ce que tu verrais? Si tu pouvais voir un atome d'argon?

Étudiant : Une simple boule.

I. : Une simple boule?

É. : Oui, oui.

I. : Et la boule, ça serait quoi?

É. : Ça serait la molécule, euh, l'atome. D'argon.

I. : Mais qu'est-ce que tu verrais? Qu'est-ce que la boule... Parle-moi des constituants de l'atome, et dis-moi qu'est-ce qui ferait la boule.

É. : Aucune idée.

I. : Les constituants... L'atome d'argon, il est constitué de quoi?

É. : Ben, d'argon.

Il semble que cet étudiant se représentait lui aussi les atomes comme des petites portions de la matière, des « petites boules d'argon », dans ce cas-ci.

Tout aussi naïve, la conception alternative concernant l'apparence d'un atome de soufre isolé était quant à elle plus répandue. L'énoncé d'une question énumérait d'abord les propriétés macroscopiques du soufre : solide cristallin friable, au point de fusion de 113 °C, de couleur jaune et qui réagit avec l'oxygène pour donner de l'oxyde de soufre. On demandait ensuite quelles propriétés auraient un atome de soufre isolé de cet échantillon. Plus de la moitié des étudiants ont répondu que l'atome conservait au moins l'une des propriétés physiques macroscopiques de l'échantillon, alors qu'en fait la seule propriété qui serait conservée serait la propriété de combinaison chimique à l'oxygène. Les étudiants formulaient des justifications comme celles-ci :

Car les propriétés sont indépendantes de la quantité d'atomes. (sujet 94)

Toutes les propriétés, car on ne change pas la nature du soufre, il reste le même. (sujet 150)

Qu'ils soient tous séparés ou ensemble, les atomes de soufre vont avoir les mêmes propriétés que son échantillon vu qu'ils forment celui-ci. (sujet 180)

Fait intéressant à noter, le sujet portant le numéro 94 était un étudiant universitaire au baccalauréat en chimie.

L'explication corpusculaire tautologique peut combiner, dans la même réponse, deux conceptions alternatives : les propriétés macroscopiques physiques sont conservées dans le domaine sous-microscopique, et les propriétés des atomes changent selon l'état de la matière, comme dans l'exemple suivant.

Car un atome de ce solide ne change pas. Cependant, si c'était un atome de soufre d'une autre phase, les propriétés ne seraient pas les mêmes. (sujet 131)

Il semble que les étudiants croient également en la transposition des propriétés des éléments et des composés. À la question où l'on demandait de choisir l'halogène qui, à

température et pression ambiantes, est un solide, plusieurs étudiants ont incorrectement choisi le chlore. Effectivement, celui-ci se trouve à l'état gazeux dans ces conditions, le seul halogène solide étant l'iode. Les étudiants justifiaient leur choix ainsi :

Le chlore dans la piscine est solide. (sujet 247)

Son état solide est sous forme de poudre et reste ainsi à T et pression normales. Ex : le chlore qu'on utilise pour l'entretien d'une piscine. (sujet 265)

Cl c'est celui qui fait partie de plus des choses courantes de la vie (sel de table, chlore de piscine, etc.). (sujet 277)

Manifestement, ces étudiants croyaient que les propriétés du composé étaient les propriétés de l'élément. Cette erreur, très fréquente, tire fort probablement son origine de l'expression « chlore à piscine », nom sous lequel on vend des granules d'hypochlorite de calcium, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$.

Selon Taber (2001a), l'explication corpusculaire tautologique, selon laquelle les étudiants transposent aux particules des propriétés de la matière macroscopique, compte parmi les erreurs les plus fréquemment observées dans les études sur les conceptions alternatives en chimie.

5.2.3.3 Conception alternative : la connexion

La conception alternative de type « Connexion » existe lorsqu'un étudiant invoque une relation qui n'existe pas entre deux concepts pour faire une prédiction ou donner une explication. Par exemple, une telle conception pourrait être lorsque deux concepts non reliés par relation causale sont mis en relation, l'un servant à « expliquer » l'autre. Ainsi, certains étudiants ont relié les concepts de liaison hydrogène et de forme des molécules. Pour expliquer la forme de la molécule d'eau, une étudiante invoque :

À cause des liaisons hydrogènes que cette molécule veut faire, elle se place d'une façon à attirer les bonnes charges aux bons endroits. (sujet 70)

La fin de la phrase d'une autre étudiante laisse entrevoir la même conception alternative :

Les charges de même polarité se repoussent, ce qui donne la forme à la molécule afin qu'elle puisse former des liaisons hydrogène. (sujet 129)

La question 1 présentée à la figure 13 (présentée à la page 115) demandait quelle molécule était linéaire. On voyait parmi les choix de réponse la structure développée de la molécule de HCN, illustrant la liaison triple entre l'atome de carbone et l'atome d'azote. Pour expliquer la linéarité de cette molécule, qui est effectivement linéaire, des étudiants invoquaient la rigidité de la liaison :

La liaison triple oriente la molécule dans un plan (pas de rotation rapide). Le doublet de l'azote et l'hydrogène s'orientent dans ce plan, ce qui donne une molécule linéaire. (sujet 97)

Les autres choix ont plusieurs doublets d'électrons autour d'eux alors que le a) a une liaison triple qui n'est pas flexible et un seul doublet libre sur le N, alors la géométrie est linéaire. (sujet 40)

La rigidité des liaisons multiples entraîne l'existence d'isomères, mais n'explique pas la linéarité des molécules. Seule la répulsion des paires d'électrons de valence l'explique.

On voyait une autre conception alternative « de connexion » à la question dans laquelle les étudiants devaient choisir la molécule la plus polaire à partir des structures semi-développées de quatre molécules organiques. L'un des choix de réponse était un alcool, le propan-1-ol. Ce n'était pas la plus polaire, la plus polaire étant un diéther. Les étudiants qui choisissaient l'alcool justifiaient toutefois souvent leur réponse ainsi :

La molécule de propan-1-ol est la seule capable de se lier à d'autres molécules par le biais de ponts hydrogène. C'est la plus polaire des attractions intermoléculaires selon Van der Waals, mis à part les liaisons ioniques. (sujet 44)

Car le H du OH peut faire des liens avec une autre molécule. (sujet 146)

Leur conception alternative pourrait s'articuler comme ceci : la molécule est polaire parce qu'elle peut faire des ponts H. Ces deux concepts sont proches conceptuellement, mais l'un ne sert pas à expliquer l'autre.

Enfin, un dernier exemple de connexion a été présenté au tableau VII : deux étudiants expliquaient qu'une molécule est linéaire parce qu'elle est non polaire. Toutefois, la polarité est en fait une conséquence et non une cause de la forme d'une molécule. La relation invoquée est donc incorrecte entre ces deux concepts.

Selon le modèle de Talanquer (2006, 2009), les conceptions qui ont été étiquetées comme étant « de connexion » viennent peut-être de ce qu'il nomme l'heuristique de disponibilité. C'est une heuristique qui réfère au fait que les étudiants arrêtent de chercher plus loin lorsqu'ils repèrent, dans leurs schémas mentaux, un concept leur paraissant relié à celui qu'ils cherchent à expliquer. Mais comme on l'a vu, le concept ainsi invoqué est souvent sans rapport avec l'explication recherchée. Un peu de la même façon que les étudiants paraissaient avoir une définition floue de ce qu'est une molécule dans les conceptions alternatives de la catégorie « Physique vu comme chimique », celles de la catégorie « Connexion » semblent indiquer que leurs schémas cognitifs autour des concepts qu'ils ont étudiés sont plutôt confus, entraînant de mauvaises réponses et un verdict de conception alternative.

5.2.3.4 Conception alternative : l'importance des facteurs

L'attribution d'une importance relative incorrecte aux facteurs permettant la prédiction d'un phénomène ou d'une propriété est un autre type de conception alternative, qui mène la plupart du temps à une mauvaise prédiction. Pour les participants à la présente recherche, il était possible de manifester une telle conception à la question qui demandait pour quelle raison principale l'acide acétique est soluble dans l'eau. Les choix de réponse du premier palier étaient tous des énoncés vrais par rapport à l'acide acétique (ses molécules sont polaires, son hydrogène acide peut s'ioniser, c'est un donneur et un accepteur de ponts H), mais la formation de ponts H avec l'eau est la raison principale qui explique sa solubilité dans l'eau, ce qui a échappé à certains étudiants :

Soluté polaire dans solvant polaire prime sur les ponts H. (sujet 226)

La solubilisation d'un soluté se fait dans un solvant semblable.
(sujet 230)

C'est la polarité qui explique la solubilité (qui se ressemble s'assemble).
(sujet 248)

Les étudiants apprennent que les liaisons hydrogène sont les liaisons intermoléculaires les plus intenses, or ils ne semblent pas comprendre que cet état de fait explique non seulement les différences de points de fusion et d'ébullition des diverses substances, mais aussi leur solubilité. Bien qu'ils connaissent les facteurs, ils en évaluent mal l'importance relative.

Cette conception alternative liée à l'importance relative des facteurs a aussi été observée lorsque les étudiants expliquaient que la structure de l'eau à l'état solide est surtout attribuable à des liaisons dipôle-dipôle. Encore une fois, bien que l'eau soit constituée de molécules polaires, entre lesquelles il se produit effectivement de telles liaisons, ce sont surtout les liaisons hydrogène entre les molécules qui expliquent la structure cristalline de la glace.

C'est à cause de δ^+ et δ^- qui alignent les molécules d'une certaine façon. (sujet 81)

On remarque que dans ces deux exemples, c'est l'importance relative des liaisons hydrogène qui est négligée par rapport aux autres facteurs. Toutefois, il est possible que ce type d'erreur de raisonnement s'applique aussi à d'autres problèmes de chimie, par exemple en ce qui concerne l'acidité des acides carboxyliques, qui peut être prédite par différents effets électroniques, mais pour laquelle l'effet de résonance a la plus grande importance. Ce sujet n'a toutefois pas fait partie de la présente recherche.

5.2.3.5 Fragmentation : le demi-raisonnement

Au contraire des conceptions alternatives, qui sont interprétées comme une construction mentale en désaccord avec la théorie scientifique acceptée, les obstacles de fragmentation montrent plutôt des idées au départ correctes, mais incomplètes ou mal assemblées. C'est le cas du demi-raisonnement.

À une question où l'on demandait d'identifier, parmi quatre schémas, lequel représentait une molécule polaire, l'une des options était un modèle en boules et bâtonnets de la molécule

de dioxyde de carbone, CO₂. Onze étudiants sur 81 (14 %) ont choisi cette option, qui est incorrecte, car la molécule de CO₂ est non polaire. Ils ont tous justifié leur réponse en expliquant, à raison, que les liaisons entre le carbone et l'oxygène sont des liaisons polaires, ou à tout le moins en invoquant la différence d'électronégativité entre le carbone et l'oxygène :

La différence d'électronégativité entre l'O et le C donne 1, ce qui donne une molécule polaire covalente? Dipôle... = polaire. (sujet 61)

Une molécule polaire est une molécule avec une différence d'électronégativité +/- élevée entre ses différents atomes. (sujet 56)

Car avec le calcul de l'électronégativité sera plus grand que 1,7 donc polaire. (sujet 62)

Bien que les liaisons de la molécule soient polaires, ce n'est pas suffisant pour que la molécule soit polaire : en effet, les vecteurs de polarité dans la molécule de CO₂, dont la géométrie est linéaire, s'opposent diamétralement et s'annulent l'un l'autre, se soldant en un moment dipolaire moléculaire nul. Il faut donc tenir compte non seulement de la polarité des liaisons de la molécule, mais également de la forme de cette dernière.

Le demi-raisonnement inverse a aussi été observé, soit qu'une molécule est polaire *exclusivement* à cause de sa forme, mais il était moins répandu. Par exemple, dans une question où les vecteurs de polarité étaient représentés sur toutes les liaisons (polaires) des molécules, un étudiant (sujet 129) a justifié sa réponse correcte de la façon suivante : « *Les atomes ne sont pas placés de manière symétrique, ce qui indique que certains d'entre eux sont plus polaires que d'autres.* » Il est à noter que cette justification ne montre peut-être pas un demi-raisonnement, mais simplement un raccourci dans la façon de rédiger la justification.

Au fil des questions, d'autres demi-raisonnements ont été relevés. Au sujet de la forme des molécules, la théorie de la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV) prédit que les paires d'électrons autour d'un atome central se positionnent de façon à minimiser leurs répulsions mutuelles. Comme observé lors de la phase préliminaire de cette recherche, il y a possibilité de deux demi-raisonnements sur cette notion : selon le premier, c'est la répulsion entre les doublets libres qui cause la forme de la molécule, et selon le deuxième, c'est plutôt la

répulsion entre les doublets liants. Ces deux demi-raisonnements ont aussi été observés dans la phase pilote. Voici des exemples de justifications n'invokant que les doublets libres...

*Parce que le S a deux doublets d'électrons libres [dans le SCl₂].
(sujet 116)*

Étant donné les doublets d'électrons libres placés symétriquement, les Cl ne sont pas repoussés ou attirés dans un sens en particulier. (sujet 129)

... pour parfois même affirmer qu'ils n'influencent *pas* la structure :

Car les électrons libres du S ne vont pas affecter la structure (vont pas le faire pivoter). (sujet 176)

L'autre demi-raisonnement, celui voulant que seuls les atomes périphériques influencent la structure, a été observé dans l'item qui demandait aux étudiants la raison expliquant la forme de la molécule d'eau. En plus des extraits déjà présentés au tableau VII, en voici un autre :

Car les charges contraires se repoussent, soit la charge entre les 2 H⁺. (sujet 131)

Ces demi-raisonnement s'appuient sur une idée correcte, ce ne sont ainsi pas des conceptions alternatives. Mais comme l'idée est incomplète, le processus du raisonnement peut mener à une mauvaise réponse malgré tout.

Ce demi-raisonnement s'apparente à l'heuristique nommée *One-Reason Decision-Making* (Gigerenzer & Goldstein, 1999), la prise de décision à raison unique dont il a été question précédemment, dans le chapitre du cadre conceptuel. Talanquer (2009) la classifie dans la catégorie des heuristiques de réduction, avec l'heuristique de non-différenciation, dont il sera question à la section suivante.

5.2.3.6 Fragmentation : la simplification abusive

La simplification abusive ressemble au demi-raisonnement, mais contrairement à ce dernier, plusieurs facteurs importants sont négligés dans l'argumentation. Si le demi-raisonnement est à demi correct, seule une petite portion de la simplification abusive est exacte.

Un exemple frappant de simplification abusive peut être puisé dans les justifications aux questions qui demandaient, parmi un ensemble de structures chimiques (présentées sous forme de schémas ou de formules chimiques), laquelle ou lesquelles représentaient des molécules. Une grande proportion des étudiants (44 %) répondaient que toutes étaient des molécules, même les structures ioniques, en le justifiant de la façon suivante :

Une molécule doit être composée de 2 atomes ou plus, et dans chacun des schémas, on retrouve des agencements différents de plusieurs atomes, donc les schémas sont des molécules. (sujet 109)

Molécules est un ensemble d'atomes. Tous représentent 2 atomes ensemble ou plus, donc une molécule (ex : cation, anion). (sujet 106)

Ce sont toutes des molécules, car les schémas représentent plusieurs atomes liés ensemble. (sujet 145)

La justification du sujet 106 est particulièrement révélatrice, puisque cette étudiante affirme en toutes lettres que les molécules peuvent être constituées d'anions et de cations. Un tel genre de réponse repose sur la conception alternative voulant que tout regroupement d'atomes constitue une molécule; l'erreur de raisonnement relève de la simplification abusive, puisqu'on néglige de considérer la structure continue ou discrète de l'organisation sous-microscopique, le caractère métallique ou non métallique des atomes et le type de liaisons, covalentes ou ioniques, des paramètres qui font tous partie de la définition de la molécule.

L'heuristique qui semble contraindre le raisonnement de ces étudiants en est une de fixation, nommée surgénéralisation (*overgeneralization* dans le texte original), dans laquelle les étudiants appliquent des principes généraux à des lois et à des contextes où il n'y a pas lieu de le faire.

Sur un autre sujet, certains étudiants semblaient croire que les molécules avaient la forme de leur structure de Lewis, c'est-à-dire plane ou avec des angles à 90°. Cette conception alternative relève elle aussi de la simplification abusive, parce qu'elle néglige tous les facteurs importants pour la prédiction de la géométrie moléculaire.

Cette conception s'est d'abord manifestée de façon frappante lors de la phase préliminaire de l'étude, pendant les entrevues. Les étudiants devaient dessiner la structure de Lewis de la molécule de chlorure de thionyle, SOCl_2 , puis en construire un modèle moléculaire en pâte à modeler. S'ils n'y parvenaient pas, ils devaient plutôt de dessiner celle de l'ion ammonium, NH_4^+ , et d'en faire un modèle en pâte à modeler. La molécule de SOCl_2 est pyramidale à base triangulaire et l'ion ammonium est tétraédrique, comme représenté à la figure 15.

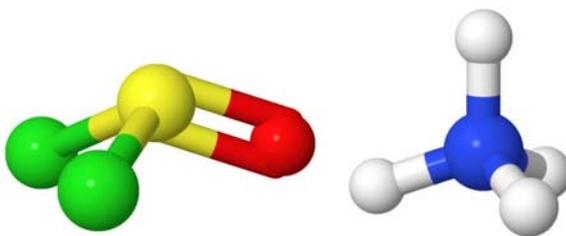


Figure 15 : Modèle tridimensionnel de la molécule de chlorure de thionyle (à gauche) et de l'ion ammonium (à droite)

Cinq étudiants sur les onze qui ont participé aux entrevues ont construit un modèle planaire du SOCl_2 ou de l'ion ammonium. Les photographies de leur modèle sont présentées à la figure suivante.

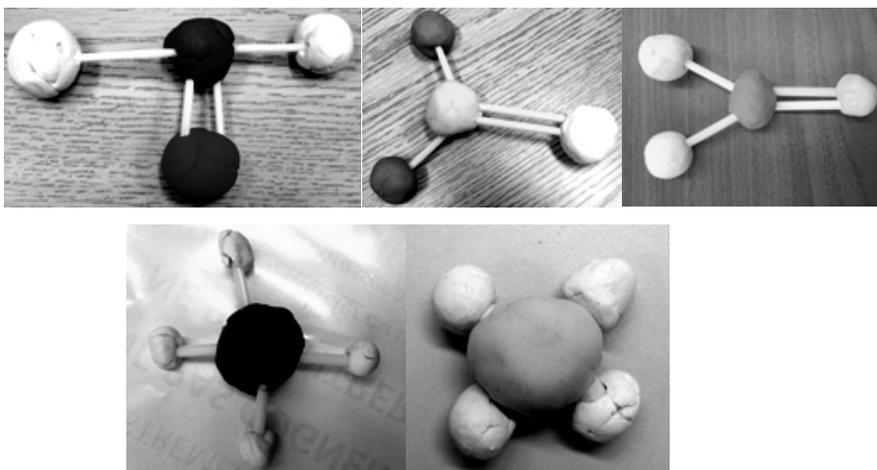


Figure 16 : Photographies des modèles planaires construits par les étudiants

Dans les discussions à propos des modèles, l'étudiante dont le modèle est le dernier sur la figure précédente disait ceci :

Intervieweur : Pourquoi est-ce que tu as représenté un angle de 90 degrés entre chaque hydrogène?

Étudiante : Parce que je l'ai représenté comme ça sur papier.

I. : Sur papier. Donc quand tu imagines une molécule, tu imagines comme une structure de Lewis.

É. : Oui.

Cette conception alternative a fait l'objet d'un item du questionnaire à justification ouverte de la phase pilote, c'est-à-dire la question 1 présentée précédemment à la figure 13.

En ce qui concerne les obstacles de fragmentation de la catégorie « Simplification abusive » déjà présentés au tableau VII, la simplification se situe au niveau de la définition de divers concepts : toute liaison entre deux atomes non métalliques est covalente, tout partage d'électrons est une liaison covalente, toute liaison entre des charges est ionique, l'eau est un bon solvant pour tout soluté. Il s'agit bien d'un raisonnement par heuristique : les étudiants arrêtent de chercher quand ils ont une partie de la bonne raison, une partie qui leur semble suffisante, mais qui ne l'est pas. Par exemple, pour la liaison covalente, les facteurs importants à considérer sont le fait que les atomes sont non métalliques ET les électrons partagés ET la différence d'électronégativité sous un certain seuil.

Toujours dans la catégorie de fragmentation « simplification abusive », on trouve l'idée selon laquelle une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire. En effet, de nombreux autres paramètres doivent être pris en compte pour juger de la polarité d'une molécule, surtout pour les molécules qui dépassent une vingtaine d'atomes. À une question où l'on présentait le propan-1-ol, la butanone, le méthoxyéthane et le diméthoxyméthane, plusieurs étudiants ont choisi l'alcool (le propanol) comme la molécule la plus polaire, en le justifiant de la façon suivante :

Un alcool est plus polaire qu'un éther ou une cétone. (sujet 111)

À cause de OH situé à la fin de cette représentation, on peut conclure que cette molécule est polaire parce qu'OH est polaire. (sujet 76)

Cette heuristique est répandue même chez les chimistes d'expérience, qui ont parfois tendance à confondre polarité et affinité avec l'eau. En ce sens, il s'agit d'une autre heuristique

de réduction, soit la non-différenciation : des variables importantes ou des conditions d'une définition sont négligées.

Les fragmentations classées comme simplifications abusives semblaient fertiles, aussi elles ont été étudiées plus avant dans la phase principale de cette recherche, et il en sera question plus loin.

5.2.3.7 Carence : l'absence de connaissance

L'absence de connaissance pouvait se voir dans deux types de réponses données par les étudiants, le premier type étant s'ils ne répondaient simplement pas à la question (ou indiquaient « je ne le sais pas »), le deuxième étant s'ils manifestaient une telle erreur factuelle qu'elle ne pouvait pas être classée d'une autre façon. Le premier type est certainement plus évident à repérer : à des questions où on demandait quelle molécule était polaire, certains étudiants n'ont pas choisi de réponse au premier palier et ont justifié leur absence de réponse ainsi :

Je me rappelle plus s'il faut que les chargent s'annulent dans le schéma ou non pour qu'une molécule soit considérée polaire. (sujet 180)

Aucune idée. Je ne me souviens pas de ce que c'est d'être polaire. (sujet 116)

Je ne me souviens plus comment déterminer cela, mais j'imagine qu'il faut que je regarde les pôles de chaque molécule. (sujet 176)

Il est à noter que ces trois étudiants avaient suivi et réussi le cours de chimie générale, où le concept de polarité et la procédure pour la déterminer sont enseignés.

À propos des autres notions de chimie visées par cette recherche, il y avait un certain nombre d'étudiants qui témoignaient de ce type d'obstacle de carence. Le tableau X qui suit présente le nombre d'étudiants qui ne répondaient pas aux questions pour chaque thème.

Tableau X : Thèmes des questions ayant fait l'objet de la phase pilote de la recherche, et pourcentage de fois que chaque thème n'a pas été répondu par les étudiants à cette phase

Thème des questions	Nombre de fois que les questions ont été distribuées aux étudiants	Nombre de fois que les questions n'ont pas été répondues	Taux de non-réponse des questions (%)
1— Notion de molécule	152	4	3 %
2— Forme des molécules	170	11	6 %
3— Polarité	684	114	17 %
4— Liaisons chimiques	421	47	11 %
5— État de la matière	758	59	8 %
6— Solubilité et mise en solution	295	53	18 %
7— Nature corpusculaire de la matière	272	41	15 %

Les questions qui pour lesquelles il était le plus fréquent que les étudiants rendent la copie sans y avoir répondu (taux de non-réponse plus élevé) sont celles à propos de la polarité, de la solubilité et de la nature corpusculaire de la matière. Comme la mise en lumière de l'obstacle de carence n'était pas le principal objectif de la recherche, les questions auxquelles les étudiants répondaient le moins souvent n'ont pas été conservées pour la phase principale de la recherche. En effet, c'étaient les réponses des étudiants qui étaient visées, et non pas leurs non-réponses. Les questions qui ont été conservées pour la phase principale avaient un taux de non-réponse compris entre 3 % et 9 %, afin de s'assurer d'un minimum de surdiagnostic.

Toujours lorsque les étudiants ignoraient manifestement tout du sujet de la question, on trouve des réponses provenant manifestement de l'interprétation des indices de surface du problème. Dans ce processus de raisonnement, seules les caractéristiques de surface sont utilisées pour bâtir un jugement, avec généralement peu de succès. Il a été question de ce genre particulier de carence lors de l'explication du raisonnement basé sur les symboles à la section 2.5.2.4, page 59. À la question « Quel solvant est le moins polaire », les choix de réponses étaient : CH_3OCH_3 , CH_2O , CF_4 , et CH_3OH . Les étudiants qui démontraient de la carence en utilisant le raisonnement basé sur les indices de surface choisissaient le CF_4 , en justifiant ainsi :

Car il n'y a pas de H. (sujet 256)

Parce qu'il ne contient pas de O. (sujet 258)

Il ne contient pas d'hydrogènes. (sujet 263)

Seule la caractéristique de surface constituant la différence la plus manifeste pouvait être invoquée par ces étudiants, qui évidemment n'avaient aucune idée de la façon de prédire la polarité des solvants (ne pouvaient donc pas s'appuyer sur un raisonnement basé sur les règles), ne connaissaient pas les modèles explicatifs à ce propos (ne pouvaient pas s'appuyer sur un raisonnement basé sur les modèles) et n'avaient pas l'expérience de ces solvants pour savoir lequel était non polaire (ne pouvaient pas s'appuyer sur un raisonnement basé sur l'expérience). Ainsi, ils ont dû s'appuyer sur un raisonnement basé sur les symboles... et grand bien leur en fit, car ils ont tous trouvé quel solvant était le moins polaire, qui était effectivement le tétrafluorure de carbone! On voit tout de suite que c'était une simple coïncidence, mais cela illustre quand même qu'une bonne réponse ne veut pas nécessairement dire que le contenu de la question est maîtrisé par les étudiants. Les étudiants qui ont répondu ainsi étaient des étudiants en train de suivre le premier cours de chimie collégial, soit Chimie générale. Ces étudiants ont ainsi été exclus de la phase principale de la recherche sur la base de leurs carences manifestes.

Le deuxième type de carence, l'erreur factuelle manifeste, se classe aussi parmi les carences parce que les étudiants démontrent sans équivoque ne pas connaître le sujet de la question. Parmi les consignes distribuées aux étudiants avec le test, on leur disait de répondre à toutes les questions. Ceux qui ne connaissaient pas la réponse, mais se pliaient à cette consigne avec bonne volonté montraient, par leurs justifications, être peu connaisseurs du sujet de la question. Par exemple, on présentait les quatre schémas suivants aux étudiants en leur demandant de choisir quelle molécule est polaire :

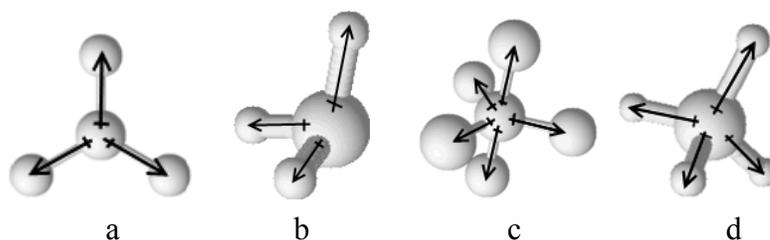


Figure 17 : Choix de réponse à la question « laquelle est polaire, boules et bâtonnets », dans la version du questionnaire à justification ouverte. La bonne réponse est b)

Une étudiante, pour justifier que la molécule a) est polaire (ce qui est incorrect), expliquait :

Parce qu'il y a une grande électronégativité entre les molécules [sic] et les vecteurs ne s'annulent pas. (sujet 172)

Il est vrai que si les vecteurs de polarité ne s'annulaient pas, la molécule serait effectivement polaire. Toutefois, ils s'annulent; cette étudiante témoigne d'une carence dans l'addition vectorielle, qui est une tâche qu'elle ne peut manifestement pas réaliser. Peu importe, ensuite, qu'elle ait des conceptions alternatives, la procédure lui est si étrangère que c'est pour cette raison qu'elle donne une mauvaise réponse à cette question.

Une autre étudiante, lorsqu'on lui demandait quel halogène était solide à température de la pièce, a répondu qu'il s'agissait du chlore :

Car il se trouve à côté de l'argon dans le tableau périodique, qui est sous forme solide à température pièce et pression constante. (sujet 230)

L'argon est un gaz rare, c'est donc bien entendu un gaz à pression et température ambiantes. Cette étudiante croyait que l'argon était solide, ce qui se classe parmi les carences, en particulier au niveau de la méconnaissance d'éléments communs.

De telles carences seront aussi observées lors de la phase principale de la recherche, à la section 5.3.

5.2.3.8 Agencement incorrect : l'argument opposé

Contrairement aux conceptions alternatives, aux fragmentations ou aux carences, les agencements incorrects ne sont pas reliés à des concepts mal maîtrisés, mais plutôt à la mise en relation correcte de concepts connus, menant à une réponse qui peut paraître illogique. Un seul agencement incorrect a été observé dans cette recherche, mais il illustre bien le principe de ce processus menant des modèles mentaux à la réponse (incorrecte).

Cet agencement incorrect est nommé ici « argument opposé » et il est très troublant. Lorsqu'ils commettent cette erreur de raisonnement, les étudiants construisent un argumentaire qui pointe exactement à l'opposé de la réponse qu'ils donnent.

Au même item sur la polarité des molécules dont il vient d'être question, et qui montrait des schémas en boules et bâtonnets (voir figure 17), les étudiants qui commettaient cette erreur choisissaient une molécule non polaire, soit la structure triangulaire plane a) ou la structure tétraédrique d), en donnant toutefois une justification différente de celle observée dans l'obstacle de carence. Cette fois, les étudiants justifiaient leur choix ainsi :

[a] Les mêmes charges (forces) de chaque côté. (sujet 34)

[b] Dispersion des charges de façon égale. (sujet 21)

[d] Parce que les vecteurs s'annulent. L'électronégativité est moyennement élevée, cela signifie donc que cette molécule est polaire. (sujet 127)

Ces justifications, exactes pour la représentation qu'ils avaient choisie, ne pointaient toutefois pas du tout vers une molécule polaire, mais bien vers une molécule non polaire!

La négation intrinsèque à l'expression *non polaire* pourrait fournir une hypothèse d'interprétation. En effet, lorsqu'un étudiant entend « non polaire », il note peut-être surtout le « non », retenant que cette molécule n'a pas quelque chose. Peut-être la relation « **non** polaire si les vecteurs ne s'annulent **pas** » se fait-elle dans son esprit, la négation étant associée à la négation.

Une autre étudiante admettait quant à elle qu'elle ne comprenait pas la logique de la procédure pour déterminer la polarité. Elle a dessiné correctement les vecteurs de polarité sur la molécule et a représenté sur un plan cartésien les vecteurs bout à bout qui donnent une résultante nulle, mais elle a écrit :

Je ne me rappelle plus s'il faut que les charges s'annulent dans le schéma ou non pour qu'une molécule soit considérée comme polaire. (sujet 180)

D'autres arguments opposés ont aussi été observés. Par exemple, à la question « laquelle est une molécule », certains étudiants choisissaient délibérément un composé ionique, en l'occurrence l'iodure de potassium, KI, comme étant constitué de molécules. Leur justification pour un tel choix pointait alors vers le composé ionique et non pas vers la molécule :

Car le K^+ et I^- peuvent former une molécule. (sujet 272)

Métal + non-métal. (sujet 227)

Car le K cherche à donner un électron de valence tandis que le I veut en prendre un pour se stabiliser. (sujet 230)

On voit que ces étudiants connaissent le principe de l'addition vectorielle, qu'ils savent d'ailleurs invoquer ces vecteurs pour parler de la polarité moléculaire, ou encore ils savent que c'est la composition élémentaire des composés qui permet de trancher entre une molécule et un composé ionique, mais bien que ces concepts soient connus, ils ne savent pas les agencer pour former une bonne réponse. Au contraire, ils concluent exactement à l'opposé de ce que leur argumentaire pointe : la molécule est non polaire parce que ses vecteurs ne s'annulent pas; ce composé est une molécule, car il est composé d'un métal et d'un non-métal.

5.2.4 Sommaire de la phase pilote de la recherche

On a vu que les taux de succès au premier palier étaient plutôt faibles lors de la phase pilote, mais ce résultat était attendu étant donné que les questions avaient été choisies pour mettre en lumière des difficultés rencontrées par les étudiants. L'analyse de leurs justifications s'est avérée très riche, permettant d'induire les raisons expliquant pourquoi ils donnaient tant de réponses incorrectes, et même parfois quelles conceptions alternatives pouvaient être dégagées de leurs réponses correctes, mais incorrectement justifiées.

La typologie des causes menant des modèles mentaux aux mauvaises réponses sera réutilisée au courant de la phase principale, phase qui permettra de quantifier la fréquence de chacun des types identifiés lors de la phase pilote.

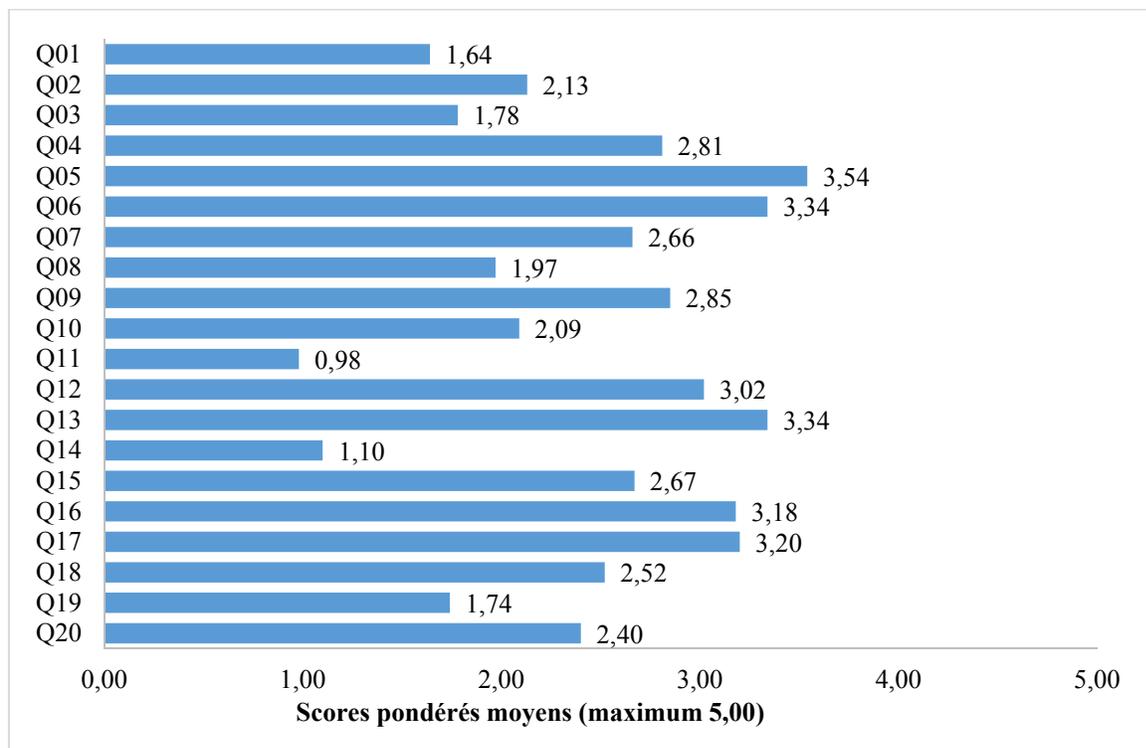
5.3 Phase principale

En ce qui a trait aux résultats de la phase principale de la recherche, le score pondéré pour chaque item sera présenté avant d'aborder l'essentiel de ce qui était principalement recherché, c'est-à-dire les conceptions alternatives relevées dans les réponses des étudiants et leur place dans la typologie proposée précédemment à la section 5.2.3.

5.3.1 Score pondéré pour chaque item

Dans la phase principale de la recherche, le score des items était pondéré sur cinq points, tel que détaillé pour chaque item dans l'Annexe E. Le score pondéré⁹ pour chaque item est présenté dans le graphique 1 qui suit.

Graphique 1 : Moyenne des scores pondérés pour chaque item du test « Molécules, polarité et phénomènes »



On peut d'abord observer que, comme dans la phase pilote de l'étude, les scores sont plutôt faibles; la moyenne des moyennes des scores est 2,448 sur 5, ce qui fait moins de 50 %, même si des points étaient souvent attribués aux réponses incorrectes. De tels scores étaient toutefois attendus, considérant que les questions du test « Molécules, polarité et phénomènes » ne visaient pas à mesurer l'habileté des étudiants ou l'atteinte des objectifs d'un cours, mais plutôt à relever les conceptions alternatives, les fragmentations ou carences dans les

⁹ Une description plus complète de la variable Score pondéré et des autres variables dépendantes est présentée dans le chapitre 4, Cadre méthodologique, à la page 96.

connaissances antérieures ou les erreurs d'agencement de concepts dont la présence était soupçonnée.

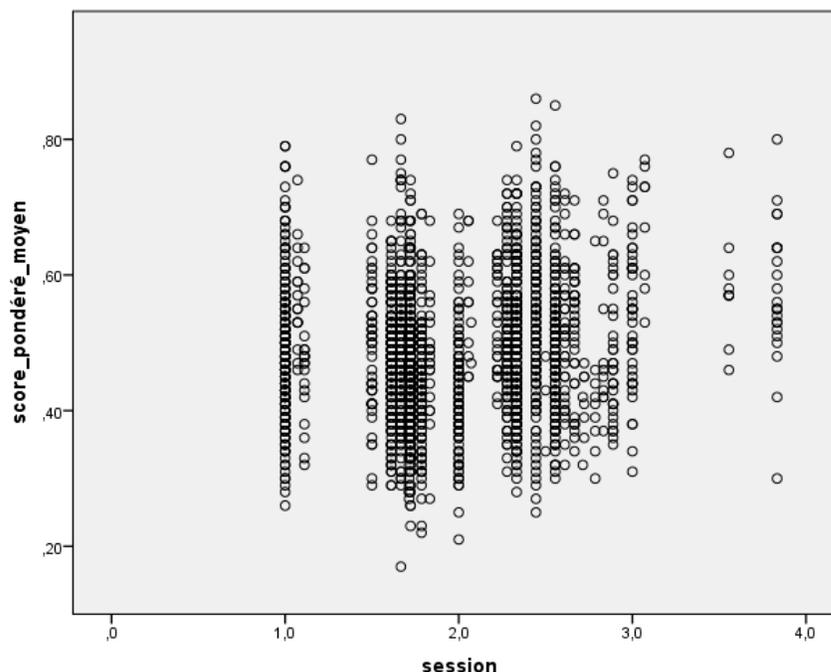
Les scores sont assez variables d'un item à l'autre, montrant que certains (Q05, Q13) étaient mieux réussis par les étudiants que d'autres (Q11, Q14). Malgré cela, des conceptions et autres obstacles ont été relevés dans les réponses à tous les items, pour certains dans une plus grande proportion que pour d'autres. Avant de présenter ces conceptions et autres obstacles, voici une analyse des scores pondérés en fonction des variables indépendantes de l'étude.

5.3.1.1 Score pondéré total en fonction de la progression dans les études

Au moment de répondre au test, tous les étudiants étaient inscrits à un cours de chimie. Il était donc possible de savoir où ils en étaient dans leurs études, c'est-à-dire la session du programme de Sciences où ils étaient rendus. Comme tous les étudiants devaient, pour répondre au test, avoir déjà suivi au minimum le cours Chimie générale, ils pouvaient répondre au test au plus tôt au début de leur deuxième session. Ce moment était considéré comme le moment « 1,0 session » sur l'échelle de la progression dans le programme. Avec la date où chaque établissement a participé et le calendrier moyen des cégeps de la province, il a été possible de placer sur une même échelle de progression dans le programme tous les étudiants ayant répondu au test¹⁰. Le graphique 2 ci-dessous présente la dispersion des scores pondérés totaux en fonction de la progression des étudiants (la session) au moment de répondre au test.

¹⁰ Étant donné la grève étudiante durant la session d'hiver 2012, les calendriers des cégeps en grève ont été modifiés, pour plusieurs, à l'automne 2012 et même à l'hiver 2013. Une correction au calcul de la variable « session » pour les étudiants de ces cégeps a été appliquée.

Graphique 2 : Dispersion des scores pondérés totaux en fonction de la progression dans le programme de Sciences de la nature au moment de répondre au test



La corrélation entre le score pondéré total et la session est positive, mais faible, avec un coefficient de corrélation de Pearson $R = 0,143$. C'est une corrélation significative ($p < 0,01$), mais la taille d'effet est faible : en effet, autour de 0,10, une valeur de R montre une corrélation faible entre les variables (Cohen, 1988). Ce n'est qu'à $R = 0,30$ que la corrélation est moyenne, et à $R = 0,50$ qu'elle est forte.

La même analyse a été réalisée entre le score pondéré total et la session pour chacun des dix établissements d'enseignement (8 cégeps publics et 2 collèges privés) qui ont fait participer à cette recherche leurs étudiants de la cohorte de première année et ceux de la cohorte de deuxième année du programme Sciences de la nature lors de l'année 2012-2013. La corrélation n'est pas significative pour sept de ces 10 cégeps, et significative, mais faible ($R = 0,141$) pour le huitième cégep.

De façon intéressante, les deux établissements pour lesquels la corrélation est significative ($p < 0,05$) et de taille moyenne sont les deux seuls dont les étudiants ayant participé au test n'étaient pas tous inscrits en Sciences de la nature : en effet, une portion d'entre eux étaient inscrits au programme de Baccalauréat International (IB), option Sciences de la nature. Pour l'un de ces établissements, la corrélation était $R = 0,254$ et pour l'autre, $R = 0,339$.

Il est possible que les étudiants du programme de Sciences de la nature et ceux de l'IB constituent deux populations différentes. Toutefois, trop peu de données sur les étudiants de l'IB ayant été recueillies durant la présente étude, il est impossible de tirer de conclusion à leur sujet. La moyenne au score pondéré total pour tous les étudiants de l'IB provenant de ces deux établissements qui ont participé à la recherche est significativement plus grande que celle des étudiants inscrits en Sciences de la nature : 57,97 % pour les étudiants de l'IB contre 48,77 % pour les étudiants de Sciences de la nature ($t = 5,555$, $N = 1983$, $p < 0,05$). La taille d'effet de cette différence est faible, avec une valeur d'êta-carré (η^2) de 0,015. L'effet est de petite taille si η^2 est autour de 0,01, de taille moyenne autour de 0,06 et de grande taille autour de 0,14 (Cohen, 1988). L'êta-carré est calculé de la façon suivante :

$$\eta^2 = \frac{t^2}{t^2 + (N - 2)}$$

Lorsque les résultats des étudiants de l'IB sont retirés, la corrélation entre la session et le score pondéré total devient non significative pour l'un des établissements qui ont fait participer des étudiants de l'IB, mais demeure significative pour l'autre établissement pour les étudiants de Sciences de la nature ($R = 0,203$, $p < 0,01$). Il pourrait être intéressant de chercher pour quelle raison seuls les étudiants de cet établissement semblaient présenter une progression au score à ce test selon qu'ils étaient en première ou en deuxième année en 2012-2013, de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'un phénomène stochastique et de vérifier si cela peut s'expliquer par le type d'enseignement.

Une hypothèse permettant d'expliquer cette observation est que cet établissement est celui qui s'est le plus engagé dans ce projet de recherche; les enseignants du département de chimie ont tous participé à l'étude à divers niveaux et étaient très au courant des conceptions alternatives fréquentes des étudiants. Plusieurs d'entre eux avaient d'ailleurs, depuis quelques sessions, adapté leur matériel de cours pour tenter le changement conceptuel. Peut-être que cette prise de conscience collective et les discussions pédagogiques en département avaient déjà eu un effet positif sur la compréhension conceptuelle des étudiants. Il est possible aussi que les étudiants de deuxième année de ce cégep aient obtenu un meilleur score pondéré total au questionnaire simplement parce qu'ils étaient plus performants en sciences au sens traditionnel que les étudiants de première année en 2012-2013. La cote R moyenne des étudiants de ce cégep a été obtenue pour chaque groupe. La comparaison des moyennes de cote R entre les étudiants

de la cohorte de première année et ceux de deuxième année de Sciences a montré une différence significative, à l'avantage de ces derniers ($t = 2,830$, $ddl = 189$). Il est toutefois impossible de comparer le score de chaque étudiant au test avec sa propre cote R, puisqu'aucune donnée permettant d'identifier les participants n'a été recueillie lors de cette étude. Ainsi, les résultats de la passation du test ne peuvent pas être associés à un étudiant en particulier.

Au-delà du score pondéré total au test, le score pondéré pour chaque item a été calculé de même qu'un coefficient de corrélation linéaire entre le score pondéré et la session, pour chacune des questions. Le tableau XI ci-dessous présente les résultats.

Tableau XI : Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre le score pondéré à chaque item et la session

Item	Sujet de la question	R	p (bilatérale)
Q01	Propriétés des atomes	0,024	0,283
Q02	Définition de molécule	0,125	< 0,001
Q03	Forme des molécules	0,038	0,089
Q04	Forme des molécules	0,110	< 0,001
Q05	Polarité	0,017	0,442
Q06	Mise en solution	0,063	0,005
Q07	Polarité	0,058	0,009
Q08	État solide	0,052	0,020
Q09	Polarité	0,007	0,770
Q10	Polarité	0,009	0,676
Q11	Liaisons	0,063	0,005
Q12	État solide	0,069	0,002
Q13	Liaisons	0,004	0,855
Q14	Changement de phase	0,044	0,048
Q15	Changement de phase	0,051	0,022
Q16	État solide	0,097	< 0,001
Q17	Liaisons	0,062	0,006
Q18	Changement de phase	-0,015	0,493
Q19	Mise en solution	0,098	< 0,001
Q20	Définition de molécule	0,003	0,911

La corrélation est significative (c'est-à-dire $p < 0,05$) pour douze questions (cellules grisées), mais, dans tous les cas, la taille d'effet est petite ($R \leq 0,125$). Il est intéressant de voir que même lorsqu'ils progressent dans leur cheminement, les étudiants n'améliorent pas leur score à des questions conceptuelles sur des notions qui étaient à l'étude lors de leur première session dans le programme de sciences. Comme ces questions peuvent révéler des conceptions alternatives, il semble que l'affirmation selon laquelle certaines conceptions sont peu

changeantes dans le temps pourrait s'avérer exacte (Johsua & Dupin, 1993; Wandersee et coll., 1994).

Au-delà de la différence de progression dans les études, certains étudiants n'avaient pas un profil régulier : en effet, la progression dans la grille de cours n'est pas automatiquement stoppée lorsqu'un étudiant a un échec à un cours, à moins que les cégeps et collèges, localement, n'imposent un préalable absolu pour tous les cours, ce qui n'était pas le cas pour la plupart des cégeps et collèges ayant participé. Les étudiants qui répondaient au test n'avaient de fait pas suivi et réussi les mêmes cours même lorsqu'ils étaient au même moment dans la progression dans les études. C'est ce dont il sera question à la sous-section suivante, afin de raffiner l'analyse du score pondéré selon le cheminement des étudiants.

5.3.1.2 Score pondéré total en fonction des cours suivis et réussis

Au tableau XII, les étudiants ont été séparés en quatre sous-échantillons, selon les cours qu'ils avaient effectivement suivis et réussis au moment de répondre au MPP.

Tableau XII : Effectif étudiant de chaque sous-échantillon, défini selon les cours suivis et réussis au moment de répondre au MPP

Sous-échantillon	Cours suivis et réussis	Nombre d'étudiants
P_0	Ni <i>Chimie générale</i> , ni <i>Chimie organique</i>	103
P_1	<i>Chimie générale</i> seulement	898
P_2	<i>Chimie générale</i> et <i>Chimie des solutions</i>	818
P_3	Au moins <i>Chimie organique</i>	164

Comme les étudiants répondaient au plus tôt au MPP durant leur deuxième session du programme de sciences, et que les cégeps et collèges sélectionnés ont une grille de cours qui prévoit un cours de chimie chaque session de la première année, les répondants au test devaient avoir au moins réussi le cours de chimie générale, offert à la première session dans toutes les grilles de cours des cégeps et collèges sondés. Dans les faits, même s'ils l'avaient suivi, certains

étudiants ne l'avaient pas réussi au moment de répondre au test. Ces étudiants constituent le sous-échantillon P_0 ¹¹.

D'autres étudiants, constituant la plus grande partie de l'échantillon, P_1 , avaient suivi et réussi le cours de chimie générale. Ils répondaient au MPP durant la session où ils étaient inscrits au cours suivant, chimie des solutions. Les étudiants d'une autre partie de l'échantillon, dans le sous-échantillon P_2 , étaient plutôt inscrits en troisième session, et avaient suivi et réussi les deux premiers cours de chimie. Enfin, une petite proportion des étudiants, P_3 , étaient inscrits en quatrième session et avaient réussi le troisième cours, chimie organique.

Comme la variable dépendante (le score pondéré) et la variable indépendante (le sous-échantillon) sont toutes deux multiples, une analyse de variance multivariée (MANOVA) a été d'abord réalisée sur l'ensemble des données pour diminuer le risque d'erreur de type I. Cette analyse s'est avérée significative ($D = 3,404$, $ddl = 60$, $p < 0,001$), permettant ainsi de comparer les sous-échantillons selon chacune des catégories de score pondéré, soit pour chaque question. Les moyennes de chaque sous-échantillon à chaque question, ainsi que les valeurs statistiques de l'analyse de la variance pour chacune, sont présentées au tableau XIII.

¹¹ Il est à noter que certains étudiants dans P_0 avaient suivi et réussi le cours de chimie des solutions. Comme le test MPP traite de sujets vus en chimie générale, puis revus en chimie organique, il était toutefois plus pertinent de classer tous les étudiants n'ayant réussi ni l'un ni l'autre ensemble.

Tableau XIII : Moyennes des scores pondérés par sous-échantillon et résultats des analyses de variance réalisées entre le score pondéré de chacun des sous-échantillons pour chaque item

Item	Sujet de la question	Moyenne des scores pondérés				F	Taille d'effet (r)
		P_0	P_1	P_2	P_3		
Q01	Propriétés des atomes	1,61	1,62	1,69	1,54	0,389	
Q02	Définition de molécule	2,07	2,01	2,25	2,27	9,334 **	0,12
Q03	Forme des molécules	1,63	1,68	1,88	1,88	1,609	
Q04	Forme des molécules	2,75	2,63	2,98	3,00	12,938 **	0,14
Q05	Polarité	3,17	3,60	3,48	3,64	1,958	
Q06	Mise en solution	3,05	3,30	3,34	3,69	6,560 **	0,10
Q07	Polarité	2,41	2,66	2,64	2,83	3,239 *	0,07
Q08	État solide	1,80	1,93	2,00	2,13	1,407	
Q09	Polarité	2,53	2,87	2,87	2,84	0,989	
Q10	Mise en solution	2,17	2,08	2,11	2,03	0,164	
Q11	Liaisons	1,04	0,91	0,97	1,43	5,548 *	0,09
Q12	État solide	2,93	2,90	3,18	2,99	3,827 *	0,08
Q13	Liaisons	3,04	3,37	3,30	3,48	1,428	
Q14	Changement de phase	1,14	0,98	1,12	1,66	7,348 **	0,10
Q15	Changement de phase	2,21	2,66	2,72	2,80	2,511	
Q16	État solide	2,96	3,08	3,28	3,36	3,104 *	0,07
Q17	Liaisons	2,85	3,13	3,29	3,30	3,057 *	0,07
Q18	Changement de phase	2,25	2,55	2,55	2,45	2,927 *	0,07
Q19	Mise en solution	1,45	1,60	1,81	2,32	12,335 **	0,14
Q20	Définition de molécule	2,34	2,39	2,39	2,52	0,342	

* Significatif à $p < 0,05$

** Significatif à $p < 0,001$

Pour neuf des 20 items, aucune différence significative entre les quatre sous-échantillons n'est observée au niveau de la moyenne des scores pondérés obtenus par les étudiants. Les étudiants répondent à ces items avec le même degré de compétence, qu'ils n'aient suivi aucun cours de chimie au cégep, un cours, deux cours, ou même plus.

Pour les onze items pour lesquels une différence significative existe entre certaines moyennes, un test post-hoc de Waller-Duncan montre deux sous-échantillons qui se distinguent des autres : le sous-échantillon P_0 et le sous-échantillon P_3 . Les deux autres sous-échantillons d'étudiants (P_1 et P_2) ne se distinguent jamais l'un de l'autre.

Bien que les différences soient significatives pour ces onze items, la taille d'effet, exprimée ici par le coefficient de corrélation r demeure faible ou entre faible et moyenne (car $r < 0,25$) (Cohen, 1988). Le coefficient r est calculé de la façon suivante :

$$r = \sqrt{\frac{SC \text{ intergroupes}}{SC \text{ totale}}}$$

Les valeurs utilisées pour ce calcul sont : « SC inter-groupes » est la somme des carrés inter-groupes et « SC totale » est le total de la SC inter-groupes et de la SC intra-groupes.

Il est intéressant d'étudier à la fois les items pour lesquels il y a une différence significative au score pondéré moyen selon le nombre de cours suivis préalablement par les étudiants, et ceux pour lesquels il n'y a pas de différence. En effet, si l'apprentissage de ces concepts de chimie était linéaire, peut-être que tous les items auraient une progression au fur et à mesure que les étudiants suivaient de plus en plus de cours.

Prenons d'abord les deux items sur la forme des molécules, Q03 et Q04¹². L'item Q03 demandait d'expliquer la forme d'une molécule d'eau, alors que Q04 demandait de prédire la forme d'une molécule donnée. Seulement à la Q04, les étudiants qui avaient suivi plus de cours réussissaient mieux. Ce résultat suggère que l'habileté de prédire les formes des molécules se développe à travers les études, mais pas celle de l'expliquer, pour laquelle les étudiants éprouvent toujours autant de difficulté. On comprend pourquoi, à la lumière de ces résultats, les étudiants réussissent à répondre à des examens traditionnels (qui demandent de prédire la forme des molécules, mais pas de l'expliquer) tout en conservant des conceptions alternatives.

Les items Q02 et Q20, sur la définition de molécule, présentent un cas semblable à celui des formes des molécules : les étudiants semblent progresser pour l'item Q02 à travers leurs études, mais pas pour l'item Q20. L'item Q02 présente des formules chimiques (H₂SO₄ et NH₄Br) et demande de distinguer laquelle ou lesquelles représentent une molécule. Cet item est mieux réussi par les étudiants du sous-échantillon P₃ que ceux de P₁. L'item Q20 est quant à lui réussi de façon comparable par les étudiants de tous les sous-échantillons; on y pose la même question qu'à l'item Q02, mais les choix de réponse sont représentés par un schéma en boules et bâtonnets. L'item Q02 demande plus d'abstraction de la part des étudiants, et c'est peut-être pourquoi cet item montre une progression lorsque les étudiants ont réussi le cours de chimie organique. Au fur et à mesure de l'avancement dans leurs études, les étudiants rencontrent de plus en plus des formules chimiques et dans le cours chimie organique, ils doivent réfléchir

¹² Le texte complet de chaque item du MPP est présenté à l'Annexe E.

comme jamais auparavant sur la réactivité différente des molécules et des « non-molécules », les sels. C'est probablement cette expérience plus développée qui explique une différence entre les sous-échantillons pour l'item Q02.

L'item Q20, qui montre des schémas, ne permet pas aux étudiants de s'appuyer sur leur habitude de rencontrer telle ou telle formule chimique, car les atomes ne sont pas identifiés sur le schéma. On sonde plus directement la représentation que les étudiants se font de la molécule, et c'est probablement pour cela qu'on ne trouve pas de différence entre les sous-échantillons. Les étudiants, même après avoir suivi tous les cours de chimie, témoignent encore d'une fragmentation de leurs connaissances sur la nature des molécules, en l'occurrence de l'idée selon laquelle tout regroupement d'atomes est une molécule, qui correspondait à une réponse de cet item qui a été choisie par plus de 50 % de l'échantillon complet, en faisant l'une des causes les plus fréquentes du processus menant à une mauvaise réponse.

Les quatre items qui traitaient de polarité montraient un profil de score pondéré similaire pour tous les sous-échantillons, sauf pour l'un d'entre eux, l'item Q07. Cet item était mieux réussi par les étudiants P_3 que par les étudiants P_0 . On y demandait de prédire la polarité des molécules représentées, mais il fallait, comme condition préalable – et bien que ce ne soit pas précisé dans la question – considérer la forme des molécules avant de tenter de prédire leur polarité. Ainsi, on retrouve la progression quant à la prédiction de la forme des molécules, discutée pour l'item Q04, plus haut, et qui était effectivement mieux réussi par les étudiants du sous-échantillon P_3 .

Il demeure que pour la plupart des questions sur la polarité des molécules, les étudiants n'obtiennent pas de meilleurs scores pondérés lorsqu'ils ont suivi et réussi plus de cours de chimie au collégial. C'est cette absence de progression sur un des thèmes centraux de la chimie au postsecondaire (Gillespie, 1997) qui est préoccupant. Les étudiants, même les finissants du programme, ont toujours autant de difficulté à répondre à des questions conceptuelles en chimie, ce qui suggère que des stratégies d'enseignement et d'évaluation différentes devraient être mises en place à travers le programme de Sciences de la nature, pour que les étudiants progressent conceptuellement durant leurs études.

Les conceptions alternatives et les autres causes de mauvaises réponses les plus fréquentes relevées par l'analyse des données recueillies par le MPP seront présentées dès la section 5.3.2, qui suit (à partir de la page 158). Mais avant d'y arriver, trois autres analyses du

Score pondéré total seront présentées, celles-ci concernant les données sociodémographiques distinguant les étudiants : leur sexe, leur région administrative et le statut de leur collège (public ou privé).

5.3.1.3 Effet de sexe, de région et de régime privé ou public

La distinction entre les garçons et les filles, de même que celle entre les étudiants des grands centres et ceux des régions, et celle entre les étudiants de collèges privés et ceux des cégeps publics, ne faisaient pas partie des questions de recherche. Ces données ont toutefois été recueillies lors de la recherche et seront très brièvement présentées ici.

Pour l'ensemble du test, les garçons ont un meilleur score pondéré total que les filles, celui-ci étant de 50,77 % pour les garçons et de 47,63 % pour les filles. Bien que significative, cette différence a une petite taille d'effet ($t = 6,653$, $\eta^2 = 0,02$, $p < 0,05$).

Pour la moitié des questions (10 sur 20), la différence de score pondéré entre les garçons et les filles est significative, et l'avantage est aux garçons dans 9 cas sur 10. Seule la question 6 a été significativement mieux réussie par les filles. La taille d'effet de ces différences est la plupart du temps faible (η^2 entre 0,00 et 0,02), sauf pour la question Q15, où la taille d'effet est moyenne (Cohen, 1988). Le tableau XIV présente le score des garçons et des filles pour ces dix items. Le texte des items est présenté à l'Annexe E.

Tableau XIV : Items pour lesquels le score pondéré est différent selon le genre

Numéro et titre de l'item		Score pondéré moyen				
		Garçons	Filles	<i>t</i>	<i>p</i>	η^2
Q01	Atome de soufre	1,851	1,486	4,350	0,000	0,009
Q03	Forme de la molécule d'eau	2,036	1,587	4,867	0,000	0,012
Q05	La plus polaire, boules et bâtons	3,815	3,330	5,651	0,000	0,016
Q06	HCOOH en solution aqueuse	3,270	3,384	-2,048	0,041	0,002
Q08	Halogène solide	2,082	1,888	2,772	0,006	0,004
Q10	Éthanol en solution aqueuse	2,323	1,925	5,022	0,000	0,013
Q14	T _{éb} , éthanol/méthanol	1,296	0,957	4,283	0,000	0,009
Q15	Vue grossie après évaporation	3,113	2,347	9,211	0,000	0,041
Q18	Vue grossie après solidification	2,653	2,430	4,609	0,000	0,011
Q20	Laquelle est molécule, diagramme	2,573	2,277	3,969	0,000	0,008

Il est mondialement reconnu que les filles ont en général de meilleurs résultats scolaires en sciences que les garçons. La dernière évaluation PISA de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, 2007) a entre autres rapporté que les filles canadiennes de 15 ans réussissaient mieux que les garçons canadiens du même âge le test standardisé servant à mesurer la performance des systèmes d'éducation dans le monde. Il est ainsi étonnant de voir que pour le test « Molécules, polarité et phénomènes », les garçons réussissent mieux que les filles. Encore une fois, cette observation peut s'expliquer par le fait que les items de ce test ne visent pas à mesurer des connaissances, mais plutôt à relever des conceptions alternatives. À la lumière de ces résultats, il semble que les garçons ont moins de conceptions alternatives ou d'autres difficultés conceptuelles que les filles sur les sujets visés dans cette étude, même s'ils ne réussissent peut-être pas mieux qu'elles dans les cours de chimie. On a déjà démontré que les étudiants peuvent obtenir de bonnes notes, mais tout de même avoir des conceptions alternatives au terme d'un cours (voir par exemple Driver & Easley, 1978). Il demeure également que le test PISA est réalisé avec des élèves du secondaire, et non avec des étudiants du collégial. Dans un rapport interne de l'un des cégeps participant à la recherche (Cégep André-Laurendeau, 2014), on voit malgré tout que le taux de succès aux cours du programme de sciences de la nature, et en particulier ceux de chimie, est plus élevé pour les filles que pour les garçons, à chaque année depuis l'automne 2009.

Quant au score pondéré total au test selon la région du Québec où se trouvait le cégep, seulement les résultats des six régions dans lesquelles plus d'un établissement a participé à la recherche ont été comparés. L'ANOVA entre la région et le score pondéré total pour ces six régions donne un résultat significatif, $F(5, 1762) = 5,330, p < 0,001$. Le tableau XV à la suite présente les sous-ensembles homogènes tels qu'établis par un test post-hoc de Waller-Duncan.

Tableau XV : Sous-ensembles homogènes de régions du Québec quant au score pondéré moyen au questionnaire MPP

Région	Nombre d'étudiants	Sous-ensemble pour alpha = 0,05		
		1	2	3
Bas-Saint-Laurent	64	0,4463		
Chaudière-Appalaches	44	0,4575	0,4575	
Montérégie	426		0,4820	0,4820
Montréal	636		0,4920	0,4920
Capitale-Nationale	498			0,4943
Abitibi-Témiscamingue	100			0,5160

À la lumière de ces résultats, les étudiants inscrits en Sciences en 2012-2013 dans la région du Bas-Saint-Laurent ont obtenu un moins bon score pondéré total que ceux de la Montérégie, de Montréal, de la Capitale-Nationale et de l'Abitibi-Témiscamingue; il faut toutefois noter que ce sous-ensemble comptait peu d'étudiants. De même, le score obtenu par les étudiants de l'Abitibi-Témiscamingue et de la Capitale-Nationale est significativement meilleur que celui obtenu par les étudiants du Bas-Saint-Laurent et de la région de Chaudière-Appalaches.

En ce qui concerne l'effet privé/public sur le score au questionnaire MPP, au moment de répondre au test dans le cadre de cette recherche, 414 étudiants étaient inscrits dans un collège privé, alors que 1569 étudiants étaient plutôt inscrits dans un cégep public. Un test T pour échantillons indépendants ne montre pas de différence significative entre le score pondéré total obtenu par les étudiants du privé et celui obtenu par les étudiants du public, $t = 0,641$ ($ddl = 1981$), $p = 0,522$.

5.3.2 Difficultés conceptuelles relevées

Au-delà des scores, le questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes » visait surtout la mise en lumière de conceptions alternatives, en plus d'autres obstacles conceptuels. Dans cette section ces conceptions alternatives, ces fragmentations, ces carences et ces erreurs d'agencement de concepts seront présentées, dont le tableau XVI dresse un aperçu. L'Annexe F fournit un tableau complet où les conceptions sont classées selon les items qui ont permis de les relever.

Tableau XVI : Aperçu des conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles relevées par le test « Molécules, polarité et phénomènes »

Cause de la mauvaise réponse / justification	Catégorie	Nombre	Sur les sujets
Conception alternative	CA-PcomC	4	Liaisons, mise en solution.
	CA-ECT	5	Nature corpusculaire de la matière, état de la matière.
	CA-Conn	6	État de la matière, forme des molécules, polarité.
	CA-ImpFac	4	Mise en solution, état de la matière.
Fragmentation	Fr-DR	13	Forme des molécules, liaisons, mise en solution, notion de molécule, polarité.
	Fr-SA	15	Forme des molécules, liaisons, mise en solution, nature corpusculaire de la matière, notion de molécule, polarité, solubilité, état de la matière.
Carence	Carence	9	Forme des molécules, polarité, état de la matière, liaisons.
Agencement incorrect	Ag-ArgOpp	2	Notion de molécule, polarité des molécules.

Les conceptions et autres difficultés conceptuelles qui sont rapportées dans le tableau XVI sont celles qui étaient présentes chez 10 % et plus des répondants. Ce choix a été fait suivant la pratique (voir, par exemple, Nicoll, 2001; Othman et coll., 2008; Peterson et coll., 1989). Dans les sections qui suivent, certaines difficultés conceptuelles dérogent à cette règle habituelle; elles ont été rapportées lorsqu'elles étaient intéressantes pour tracer le portrait des étudiants de Sciences.

Certaines difficultés touchent un grand pourcentage des étudiants, une situation qui devrait préoccuper les enseignants de chimie. Plusieurs de ces conceptions alternatives, fragmentations, carences et agencements incorrects semblent se regrouper autour d'un cadre conceptuel alternatif autour de la notion de liaison, dont il sera question un peu plus loin. Voyons d'abord les principales difficultés relevées pendant cette recherche.

5.3.2.1 Difficultés conceptuelles sur la notion de molécule

La notion de molécule est au cœur de l'enseignement de la chimie. Les enseignants emploient très fréquemment le mot « molécule »; toutefois, les résultats de la présente étude tendent à démontrer que la représentation qu'en ont les étudiants est très approximative. Le tableau qui suit présente les principales fragmentations, carence et agencement incorrect observées à propos de la notion de molécule.

Tableau XVII : Principales difficultés conceptuelles sur la notion de molécule

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Tout regroupement d'atomes est une molécule.	Fr-SA	Q02	a1, a2, a3	1564 (78,9 %)
		Q20	c1, c2, c3	1001 (50,5 %)
Argument ionique pour moléculaire.	Ag-ArgOpp	Q20	b3	66 (3,3 %)
Une molécule est formée d'atomes liés par des liaisons covalentes.	Fr-DR	Q20	a2	290 (14,6 %)
Une molécule est formée de non-métaux.	Fr-DR	Q02	b2, c2	79 (4,0 %)
		Q20	a1	69 (3,5 %)

Comme il avait été observé dans la partie préliminaire de l'étude, la simplification abusive voulant que « tout regroupement d'atomes est une molécule » est extrêmement répandue chez les étudiants collégiaux. En fait, c'est la plus répandue parmi les difficultés conceptuelles relevées dans le cadre de cette étude. Deux items étaient destinés à sonder cette simplification abusive : l'item 2 et l'item 20. Pour ces items, respectivement 78,9 % et 50,5 % des étudiants ont fait un choix de réponse correspondant à cette difficulté particulière. La différence entre ces deux pourcentages peut s'expliquer par la difficulté de la question. L'item 2 demandait lequel d'un sel (NH_4Br) ou d'un composé moléculaire (H_2SO_4) était constitué de molécules, alors que l'item 20 présentait le schéma d'un sel et le schéma de molécules diatomiques. Pour répondre à la question 20, il suffisait de se fier aux caractéristiques explicites, soit le caractère continu ou discret des schémas présentés. Pour répondre à la question 2, par contre, il fallait invoquer une caractéristique implicite des formules chimiques présentées, soit le fait que les constituants de base du NH_4Br sont des ions. Les questions qui nécessitent d'invoquer des caractéristiques implicites sont reconnues comme plus difficiles (McClary & Talanquer, 2011). Au-delà de leur difficulté intrinsèque respective, ces deux questions cherchaient à trouver une cause à la même erreur. La difficulté conceptuelle associée à cette question est classifiée comme une simplification abusive, comme en témoigne l'énoncé qui la désigne : « tout regroupement d'atomes est une molécule », le mot « tout » ne faisant pas suffisamment de distinction entre les différents regroupements d'atomes.

Ces deux items ont permis d'observer d'autres difficultés, bien entendu avec des pourcentages plus modestes. Une seule autre était présente chez plus de 10 % des répondants : il s'agit du demi-raisonnement selon lequel « une molécule est formée d'atomes liés par des

liaisons covalentes » (14,6 % des répondants), qui est sensiblement équivalent à l'autre demi-raisonnement « une molécule est formée de non-métaux », les non-métaux formant des liaisons covalentes (3,5 et 4,0 %). Peu d'étudiants (1,4 %) ont choisi l'autre moitié du raisonnement, « les molécules sont des entités discrètes ». Enfin, un argument opposé a été observé, « l'argument ionique pour moléculaire », chez seulement 3,3 % des étudiants, dans lequel les étudiants expliquaient qu'un sel est une molécule parce qu'il est formé d'ions.

5.3.2.2 Difficultés conceptuelles sur la forme des molécules

Il a déjà été question de la plupart des difficultés conceptuelles sur la forme des molécules dans la section sur la phase pilote de la recherche. Le tableau XVIII présente les principales difficultés sur ce sujet qui ont été vues aussi lors de la phase principale.

Tableau XVIII : Principales difficultés conceptuelles sur la forme des molécules

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide.	CA-Conn	Q04	a2	549 (27,7 %)
La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les doublets libres.	Fr-DR	Q03	a1, b1	508 (25,6 %)
La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les atomes périphériques.	Fr-DR	Q03	a2, b2	417 (21,0 %)
La forme d'une molécule est causée par la présence ou l'absence de doublets libres sur l'atome central.	Fr-DR	Q04	a1	336 (16,9 %)
La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les électrons liants ET les liaisons ne se repoussent que lorsqu'elles sont polaires.	Fr-DR et plus	Q03	a3	327 (16,5 %)
Une molécule a la forme de sa structure de Lewis.	Fr-SA	Q04	b2, c2	466 (23,5 %)
Une molécule symétrique est linéaire.	Fr-SA	Q04	b3, c3	235 (11,9 %)
La forme d'une molécule est causée par les liaisons hydrogène qu'elle peut faire.	CA-Conn	Q03	c1, c2, c3	544 (27,4 %)
La forme d'une molécule est causée par sa polarité.	CA-Conn	Q16 Q04	b2, c2 c1	276 (13,9 %) 151 (7,6 %)

La conception alternative la plus fréquente sur ce sujet est la première, de type « Connexion », selon laquelle « la molécule [dans la question, il s'agissait du HCN] est linéaire parce que sa liaison triple n'est pas flexible » (27,7 % des étudiants). Il n'est pas faux d'affirmer

qu'une liaison triple n'est pas flexible, mais invoquer cette rigidité pour expliquer la linéarité de la molécule constitue une erreur. Comme les liaisons triples mènent toujours à une géométrie moléculaire linéaire, ces deux concepts sont interreliés dans l'esprit des étudiants, mais parfois dans un mauvais rapport de causalité, comme c'était le cas ici.

Dans les réponses à la question Q03, il a été observé, chez 25,6 % et 21,0 % des étudiants, respectivement, les deux demi-raisonnements selon lesquels la forme d'une molécule serait causée « par la répulsion entre les doublets libres » et « par la répulsion entre les atomes périphériques ». Il est intéressant de noter que certains de ces étudiants avaient la bonne réponse au premier palier (l'option b) alors que d'autres avaient la mauvaise réponse (l'option a). La réponse au premier palier, comme souvent, n'était donc pas suffisante pour détecter une fragmentation des connaissances. La difficulté conceptuelle selon laquelle « la forme d'une molécule est causée par la présence ou l'absence de doublets libres », qu'a permis de mettre au jour la question Q04, est semblable au premier demi-raisonnement mentionné ici.

Un pourcentage assez élevé (16,5 %) des étudiants ont répondu de telle façon à la question Q03 que deux difficultés conceptuelles liées se manifestaient à l'analyse : « la forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les électrons liants ET les liaisons ne se repoussent que lorsqu'elles sont polaires », ce qui correspondait à l'option a3 : « l'électronégativité rend les liaisons polaires, donc elles se repoussent entre elles ». En réalité, les liaisons, qu'elles soient polaires ou non, se repoussent toujours entre elles. Cette réponse tend à faire penser que les étudiants pouvaient croire que les liaisons peuvent être « neutres » et ne pas se repousser entre elles.

Deux simplifications abusives ont également été observées : « une molécule a la forme de sa structure de Lewis » (23,5 %) et « une molécule symétrique est linéaire » (11,9 %). Enfin, deux autres erreurs de connexion ont été relevées, selon lesquelles la forme d'une molécule serait causée « par sa polarité » (13,9 % et 7,6 %) ou « par les liaisons hydrogène qu'elle peut faire » (27,4 %). Pourtant, la forme de la molécule est une cause et non une conséquence de la polarité. C'est aussi notamment à cause de sa forme que la molécule établit des ponts H avec ses voisines. Cette deuxième conception alternative ressemble à une raison téléologique : les étudiants croyaient peut-être que c'est pour faire des liaisons hydrogène que la molécule d'eau prend cette forme particulière.

5.3.2.3 Difficultés conceptuelles sur la polarité

Trois items posaient la question « laquelle est la plus polaire » : Q05 présentait des modèles en boules et bâtonnets, Q07, des structures de Lewis et Q09, des structures semi-développées. Il est à noter que la question Q09 a deux réponses acceptables (c'est-à-dire qui valent 5 points pour le score pondéré), soit la butanone (option b) et le diméthoxyméthane (option c). Le diméthoxyméthane a une polarité empirique très faible, soit 0,74 D (HCP, 2013), mais pour le prédire théoriquement, on doit déployer un raisonnement qui dépasse largement le contexte de l'enseignement de la chimie au collégial. En effet, selon le conformère du diméthoxyméthane considéré, c'est-à-dire sa forme dans l'espace à un moment précis, cette molécule peut être plus polaire ou moins polaire que la butanone. Le défi de prédire cette différence est si complexe qu'un étudiant pourrait se tromper sans qu'on doive pour autant le taxer d'avoir des conceptions alternatives. Cette question, idéalement, n'aurait pas dû présenter un choix de réponse aussi ambigu. N'empêche que certaines combinaisons de choix de réponse au premier et deuxième palier ont permis de détecter des conceptions alternatives, dont il sera question ici.

Sur le thème de la polarité, les difficultés principales concernaient la polarité des molécules. Les trois questions testaient le demi-raisonnement « une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires » (Q05, Q07 et Q09). La proportion des étudiants qui faisaient un choix démontrant ce demi-raisonnement variait d'une question à l'autre, entre 5,6 % pour la Q05 et 24,1 % pour la Q07. Le tableau XIX présente les résultats concernant ces trois items. L'autre demi-raisonnement, soit que la molécule est polaire parce qu'elle est asymétrique, ne faisait pas l'objet de question dans le test.

Tableau XIX : Principales difficultés conceptuelles sur la polarité

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	Fr-DR	Q07	a1, b1, c1	477 (24,1 %)
	Fr-DR	Q09	b3	301 (15,2 %)
	Fr-DR	Q05	a3, b3	112 (5,6 %)
Une liaison double est plus polaire qu'une liaison simple.	Fr-DR	Q09	b1	378 (19,1 %)
Argument non polaire pour polaire.	Ag-ArgOpp	Q05	a1, c3	246 (12,4 %)
	Ag-ArgOpp	Q07	a3, b3, c3	189 (9,5 %)
	Ag-ArgOpp	Q09	c3	97 (4,9 %)
Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	Fr-SA	Q09	a1	216 (10,9 %)
	Fr-SA	Q19	b3	142 (7,2 %)
Une molécule est polaire parce qu'elle fait des liaisons hydrogène.	CA-Conn	Q09	a2	142 (7,2 %)
Erreur dans la prédiction de la forme d'une molécule OU Erreur dans l'addition vectorielle.	Carence	Q07	a2, b2	1169 (59,0 %)
Erreur dans l'addition vectorielle.	Carence	Q05	a2, c1	328 (16,5 %)
		Q09	a3	58 (2,9 %)
Erreur dans la prédiction de la polarité d'une substance (sans pouvoir en déterminer la raison).	Carence	Q19	a1	517 (26,1 %)
		Q11	a2, c2	433 (21,8 %)
		Q06	b3, c3	127 (6,4 %)

Chez 19,1 % des répondants, un autre demi-raisonnement a toutefois été observé, selon lequel « une liaison double est plus polaire qu'une liaison simple ». Pour être correct, ce raisonnement devrait comprendre cette autre moitié : « lorsque les atomes ont une différence d'électronégativité suffisante ». En effet, les liaisons doubles carbone-carbone, par exemple, ne sont pas polaires. Peut-être que les étudiants confondaient la réactivité des liaisons doubles, susceptibles d'être attaquées par un réactif électrophile (qui est attiré par les charges négatives), avec la polarité de la liaison.

L'argument opposé « non polaire pour polaire », même si assez marginal (entre 4,9 % et 12,4 %), vaut tout de même la peine d'être mentionné. Qu'il s'agisse d'un problème de compréhension de la question ou de la définition du mot « polaire », il est important pour les enseignants de savoir que dans leur classe, un petit nombre d'étudiants croient qu'une molécule

est polaire « parce que ses vecteurs de polarité s'annulent entre eux ». Il s'agit d'un agencement incorrect des concepts.

De même, la simplification abusive « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire », observée dans les réponses aux questions Q09 et Q19 chez un petit nombre d'étudiants (7,2 % et 10,9 %), demeure intéressante. Elle se manifeste à la question Q09 lorsque les étudiants choisissent le butanol (un alcool) comme molécule la plus polaire au détriment de la butanone (une cétone), et à la question Q19, lorsqu'ils choisissent la pentanamine (une amine) comme le composé le plus soluble dans l'eau, justifiant leur choix en disant que c'est une substance polaire. Si le butanol et la pentanamine sont un peu solubles dans l'eau, c'est parce que leurs molécules font des ponts H avec les molécules d'eau, et non pas parce que ce sont des molécules polaires. Au contraire, le butanol et la pentanamine ne sont pas très polaires : 1,66 D (HCP, 2013) et 0,82 D (calculé avec le logiciel MarvinSketch 6.0.1), en comparaison, par exemple, avec la butanone, à 2,779 D (HCP, 2013). Même la molécule d'eau n'est que moyennement polaire, à 1,8546 D (HCP, 2013). Il arrive souvent que la polarité et la solubilité dans l'eau soient confondues ou amalgamées dans l'esprit des étudiants, et même des chimistes chevronnés. Ce raisonnement semble issu de l'application d'une heuristique qui peut s'avérer souvent efficace, mais pas toujours. Les étudiants doivent apprendre la distinction entre ces deux notions, qui est importante en laboratoire pour prendre des décisions éclairées quand vient le temps de choisir un solvant approprié.

Concernant la polarité des composés, certaines erreurs dans les réponses des étudiants ont été relevées, sans toutefois que ce soient des conceptions alternatives; ce sont en réalité plutôt des obstacles de carences, des manques de connaissances. À la question Q07, 1111 étudiants ont choisi la molécule a) (XeF_4) comme étant la plus polaire et ont justifié leur choix en optant pour « ses vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux » (choix de réponse a2); manifestement, ils ne se sont pas attardés à tenter d'en prédire la forme. La molécule de XeF_4 est plane carrée, ses vecteurs de polarité s'annulent donc entre eux, mais sa structure de Lewis ne la représentait pas ainsi, c'est pourquoi cette question était un piège. Les étudiants qui ont cru que les vecteurs de polarité de XeF_4 ne s'annulaient pas entre eux n'avaient peut-être pas de conception alternative à ce sujet, c'est pourquoi ces 59,0 % des répondants ont plutôt été considérés comme ayant commis une erreur dans la prédiction de la forme de la molécule ou dans l'addition vectorielle. La prédiction de la forme de molécules ayant plus de quatre paquets

électroniques autour de l'atome central, comme c'était le cas ici, est reconnue comme une tâche difficile pour les étudiants (Furió & Calatayud, 1996).

D'autres erreurs ont été observées dans l'addition vectorielle aux questions Q05 et Q09. C'était particulièrement manifeste à la question Q05, où les vecteurs de polarité étaient dessinés sur les molécules. La seule tâche à accomplir pour répondre à cette question était d'additionner les vecteurs, ce que 16,5 % des étudiants ne sont pas parvenus à faire correctement. Des erreurs ont été observées quant à la prédiction de la polarité d'une substance (Q06, à propos de l'acide formique) ou d'une molécule (Q11, à propos du H_2Se et du SiF_4 , et Q19, à propos du CO_2) sans arriver à trancher sur ce qui pouvait les avoir causées : c'était peut-être les demi-raisonnements « une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires » ou « une molécule est polaire si elle est asymétrique », ou autre chose encore.

5.3.2.4 Difficultés conceptuelles sur les liaisons chimiques

Comme annoncé précédemment, la conception alternative la plus grave à propos des liaisons chimiques se rapproche en fait d'un cadre conceptuel alternatif, c'est-à-dire un assemblage de difficultés conceptuelles qui s'expriment ensemble autour de plusieurs sujets (Taber, 1998). Ce cadre alternatif se manifeste dans la difficulté qu'ont les étudiants à distinguer les différents types de liaisons chimiques : ils mettent effectivement toutes ces définitions dans le même « grand sac » conceptuel. Dramatique pour l'apprentissage de la chimie, ce cadre alternatif regroupe les difficultés conceptuelles les plus fréquentes détectées lors de cette étude : « les liaisons intermoléculaires sont les liaisons à l'intérieur des molécules », « les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes », « les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle », « l'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules » et « les liaisons covalentes se brisent lors de la mise en solution ». Le tableau XX présente les pourcentages d'étudiants montrant ces simplifications abusives et ces conceptions alternatives. Les difficultés conceptuelles se rapportant au cadre alternatif des liaisons chimiques sont dans les cellules grisées de ce tableau.

Tableau XX : Principales difficultés conceptuelles sur les liaisons chimiques

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
<i>Liaisons intermoléculaires</i>				
Les liaisons intermoléculaires sont les liaisons à l'intérieur des molécules.	Fr-SA	Q11	b1, c3	979 (49,4 %)
Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	Fr-SA	Q17	b1, b2, b3, c1, c2, c3	778 (39,2 %)
	Fr-SA	Q13	a1, a2	450 (22,7 %)
Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	Fr-DR	Q17	a1	325 (16,4 %)
	Fr-DR	Q11	a3	137 (6,9 %)
L'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement causée par la taille des molécules.	Fr-DR	Q11	b2, c1	207 (10,4 %)
Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	Fr-SA	Q18	a3, b2	221 (11,1 %)
	Fr-SA	Q13	b2, c3	193 (9,7 %)
	Fr-SA	Q17	a3	188 (9,5 %)
<i>Liaisons covalentes</i>				
L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	CA-PcomC	Q14	b1, c1, c2, c3	1221 (61,6 %)
		Q15	a1, b1, b2, b3, c1	848 (42,8 %)
Les liaisons covalentes se brisent lors de la mise en solution.	CA-PcomC	Q19	b1	212 (10,7 %)
Erreur dans l'identification des molécules faisant des liaisons hydrogène (certaines en font, mais l'étudiant dit qu'elles n'en font pas).	Carence	Q14	a1, a2, a3	390 (19,7 %)
Les liaisons chimiques sont nécessairement représentées par des bâtonnets.	Carence	Q20	b1	200 (10,1 %)

La question Q11 demandait quel composé faisait les liaisons intermoléculaires les plus fortes. Certains étudiants répondaient en invoquant les liaisons à l'intérieur même des molécules, soit les liaisons intramoléculaires, plutôt que les liaisons entre les molécules, démontrant une simplification abusive sur la nature des liaisons chimiques. D'autres études ont aussi rapporté cette confusion (Othman et coll., 2008; Treagust, 1988). À l'inverse, dans les questions Q13 et Q17, de nombreux étudiants croyaient que les liaisons hydrogène (intermoléculaires) étaient des liaisons covalentes (intramoléculaires). Comme ce n'étaient pas

nécessairement des étudiants différents, plusieurs étudiants manifestaient l'une ou l'autre de ces conceptions selon les questions posées. Il ne semble pas y avoir de tendance ou de profil à établir, apparemment les étudiants ont une idée assez confuse de la distinction entre liaisons inter et intramoléculaires. De la même façon, certains étudiants croyaient que les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle (environ 10 %), bien que ce soient deux types très différents de liaisons intermoléculaires. Ces trois simplifications abusives constituent la première partie du cadre conceptuel des liaisons chimiques.

La seconde partie de ce cadre conceptuel alternatif concerne les liaisons qui sont brisées lors de phénomènes comme le changement de phase ou la mise en solution. Bien que ce soient les liaisons intermoléculaires qui se brisent alors, plusieurs étudiants croient que les liaisons covalentes (intramoléculaires) sont brisées lors de ces changements physiques. Il faut en particulier remarquer que 1221 étudiants ont répondu que ce sont les liaisons covalentes des molécules qui expliquent la différence de point d'ébullition entre deux alcools, ce qui constitue 61,6 % de l'échantillon.

Deux demi-raisonnements ont aussi été observés, soit qu'une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène (ce qui n'est qu'une condition sur deux, l'autre étant que cet hydrogène soit lié à un petit atome très électronégatif) et que l'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement due à la taille des molécules (alors que la polarité a aussi une influence).

Les réponses des étudiants sur les liaisons chimiques présentaient aussi deux erreurs. À la question Q14, 19,7 % des étudiants ont expliqué la différence de point d'ébullition entre deux alcools par le fait que l'un des deux faisait des ponts H, contrairement à l'autre. Il s'agit d'une erreur, puisque ces deux alcools font des ponts H. L'autre erreur se manifestait à la question Q20, lorsque les étudiants considéraient que parmi les regroupements d'atomes suggérés, seul le composé ionique était une molécule, et qu'ils justifiaient leur réponse en disant que les liaisons étaient explicitées sous forme de bâtonnets dans le schéma du sel seulement. C'est 10,1 % des étudiants qui ont sélectionné cette restriction non nécessaire, qui a aussi été classée comme carence.

5.3.2.5 Difficultés conceptuelles sur l'état de la matière

Seulement deux conceptions alternatives autour de l'état de la matière ont été observées, car moins d'items portaient sur ce sujet. Le tableau XXI présente ces résultats.

Tableau XXI : Principales difficultés conceptuelles sur l'état de la matière

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	CA-ECT	Q08	c1	218 (11,0 %)
		Q14	b3	110 (5,5 %)
L'intensité des liaisons intermoléculaires (et non l'énergie cinétique des molécules) explique l'état de la matière.	CA-Conn	Q18	a1, b1	178 (9,0 %)
		Q12	c3	70 (3,5 %)

La première conception à ce sujet, « une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes », est classée dans la catégorie de l'explication corpusculaire tautologique. Comme on l'a vu, ce type de raisonnement se manifeste lorsque les étudiants attribuent aux particules sous-microscopiques (les atomes, les molécules) des propriétés qui relèvent du domaine macroscopique (comme la couleur, l'odeur ou la densité). À la question Q08, où l'on demandait quel halogène est un solide, certains étudiants ont choisi la bonne réponse, l'iode, mais la justification affirmant que celui-ci « a tendance à rester au fond du contenant dans lequel il se trouve » (11,0 % des répondants). Cela semble résulter d'une confusion entre la masse moléculaire et la densité, deux concepts situés à des domaines du savoir différents. En effet, à l'échelle des atomes et des molécules, le poids d'une particule n'a pas d'influence significative sur son mouvement (García Franco & Taber, 2009). À la question Q14, la justification « plus les molécules ont une masse moléculaire élevée, plus il est difficile de les faire changer de phase, car elles sont plus lourdes » (choisie par 5,5 % des répondants) dénote le même genre de confusion entre propriétés sous-microscopiques et propriétés macroscopiques.

Bien qu'elle ait été présente chez peu d'étudiants, il semble intéressant de souligner une autre erreur de raisonnement, de type « Connexion », qui ressemble à certaines idées naïves. Grâce à la question Q12, il a été découvert que certains étudiants (3,5 %) croyaient que les liaisons hydrogène sont moins intenses dans un liquide. La question Q18 a permis de voir qu'une autre proportion d'étudiants (9,0 %) semblaient croire que des ponts H n'existent que dans la

phase solide, pas dans la phase liquide. Ces deux idées semblent associées à la conception selon laquelle ce n'est pas l'énergie cinétique des molécules qui est responsable de l'état de la matière, mais plutôt l'intensité – ou l'existence – des liaisons intermoléculaires. Même si c'est par la prédiction des liaisons intermoléculaires qu'on peut juger de la température de changement de phase, c'est plutôt l'énergie cinétique qui explique, en fin de compte, si la matière est liquide ou solide : trop d'énergie cinétique et les molécules glissent les unes sur les autres, les liaisons intermoléculaires sont vaincues et la matière devient liquide. Les liaisons intermoléculaires ne changent pas d'intensité selon l'état de la matière : c'est la matière elle-même, ses particules qui ont plus ou moins d'énergie cinétique.

5.3.2.6 Difficultés conceptuelles sur la solubilité et la mise en solution

Un autre phénomène macroscopique, la mise en solution, de même que le concept corrélé de solubilité, a fait l'objet de questions dans le test. Le tableau XXII présente les conceptions alternatives et les obstacles de fragmentation sur ces sujets.

Tableau XXII : Principales difficultés conceptuelles sur la solubilité et la mise en solution

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	CA-PcomC	Q10	a3, c1	383 (19,3 %)
		Q19	c1	63 (3,2 %)
La mise en solution de composés moléculaires se solde en la réorganisation du solvant et du soluté en de nouveaux composés.	CA-PcomC	Q10	c2	247 (12,5 %)
Lors de la mise en solution, des liaisons intermoléculaires se forment entre les particules de solvant et de soluté, mais aucun lien n'est brisé.	Fr-DR	Q10	a1	287 (14,5 %)
Aucune liaison intermoléculaire n'est formée ni brisée lors de la mise en solution.	Fr-SA	Q10	b3	472 (23,8 %)
La mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant.	CA-CcomP	Q19	a3	221 (11,1 %)
Il n'y a pas de liaisons intermoléculaires entre les molécules dans une solution.	CA-CcomP	Q10	b1, b2	244 (12,3 %)
La formation de ponts H avec l'eau suffit pour qu'un composé y soit très soluble.	CA-ImpFac	Q19	b2, c2	541 (27,3 %)
La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à l'ionisation.	CA-ImpFac	Q06	a1, b1, c1	1050 (53,0 %)
La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à la polarité.	CA-ImpFac	Q06	a3	256 (12,9 %)

Les deux premières conceptions alternatives de ce tableau, dans les cellules grisées, se rapportent au cadre conceptuel alternatif de la liaison chimique, ce qui a été nommé plus haut le « grand sac » des définitions des liaisons chimiques (voir la section « Difficultés conceptuelles sur les liaisons chimiques » à la page 167). Ainsi, celui-ci se manifeste ici lorsque les étudiants croient que les molécules s'ionisent toujours en solution ou, pire encore, que de nouvelles liaisons covalentes se forment entre les atomes des molécules de soluté et de solvant. Ces deux conceptions alternatives ont particulièrement été observées dans les réponses à l'item Q10, qui portait sur le passage en solution aqueuse de l'éthanol. Il est notamment troublant de voir que, même lorsqu'ils avaient la bonne réponse au premier palier (l'option c), soit qu'il y a à la fois bris et formation de liaisons lors du passage en solution, plus d'étudiants choisissaient une justification manifestant une conception du cadre alternatif de la liaison chimique (570 étudiants, soit 28,7 %) plutôt que la bonne justification (258 étudiants, soit 13,0 %). Trois cent vingt-trois étudiants (16,3 %) ont choisi la justification « des liaisons covalentes dans les molécules se brisent pour former des ions, et de nouvelles liaisons entre ces ions se forment » et 247 étudiants (12,5 %) ont choisi « les atomes des molécules d'eau et d'éthanol se réorganisent en de nouvelles molécules ». Il a été démontré que les étudiants confondent souvent les concepts de dissolution, d'ionisation et dissociation ionique (Butts & Smith, 1987); ils ont tendance à voir les molécules s'ioniser de la même façon que les sels se dissocient dans l'eau, formant ainsi des ions.

Les deux difficultés suivantes du tableau XXII, soit les obstacles de fragmentation selon lesquels aucun lien n'est brisé lors de la mise en solution, sont probablement nées d'une précaution louable de la part d'étudiants qui cherchaient à ne pas tomber dans le « grand sac » du cadre conceptuel alternatif de la liaison chimique. Toutefois, à force de précaution, ils ont glissé vers un demi-raisonnement ou une simplification abusive en négligeant de considérer le bris et la formation de liaisons intermoléculaires qui expliquent en réalité la miscibilité des composés les uns dans les autres. Ces fragmentations ont été observées chez 14,5 % et 23,8 % des étudiants.

Parce qu'elle pousse à l'extrême ce même raisonnement, la conception alternative suivante du tableau XXII, soit « la mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant » (11,1 % des répondants), a été classée dans la catégorie « Chimique vu comme physique ». Cette catégorie ne faisait pas partie à proprement parler de

la typologie présentée précédemment, mais elle se trouve à être tout juste l'opposé de « Physique vu comme chimique » : les étudiants conçoivent un phénomène chimique comme un processus strictement physique, dans lequel aucune liaison chimique n'est impliquée. La conception alternative « il n'y a pas de liaisons intermoléculaires entre les molécules dans une solution » (12,3 % des répondants) relève elle aussi de cette catégorie.

Les trois dernières difficultés conceptuelles sur la solubilité sont des conceptions alternatives du type « Importance des facteurs ». C'est-à-dire que les choix de réponses qui y correspondent sont des énoncés exacts, mais pas les « plus vrais » dans le contexte. Par exemple, dans l'item Q06, ce sont les liaisons hydrogène que forment les molécules d'acide formique avec celles de l'eau qui expliquent le mieux la solubilité mutuelle de ces deux substances. Choisir une autre raison, par exemple parce que la molécule d'acide s'ionise dans l'eau, montre qu'on ne connaît pas l'importance relative des facteurs. De la même façon, invoquer le fait qu'une amine très peu polaire (le choix de réponse b) de la question Q19) est plus soluble dans l'eau qu'une molécule très polaire qui n'est pas un donneur de pont H ne considère pas correctement l'importance des facteurs : en effet, à la question Q19, la molécule la plus polaire est aussi celle qui est la plus soluble dans l'eau. Même si ces raisonnements ne sont pas complètement erronés, ils devraient être changés lors de l'apprentissage de la chimie.

5.3.2.7 Difficultés conceptuelles sur la nature corpusculaire de la matière

Quelques conceptions alternatives à propos de la nature corpusculaire de la matière, la plupart faisant partie de la catégorie « Explication corpusculaire tautologique » ont été notées. Le tableau XXIII présente ces conceptions et les autres difficultés conceptuelles relatives à la nature corpusculaire de la matière.

Tableau XXIII : Principales difficultés conceptuelles sur la nature corpusculaire de la matière

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Les atomes ont des propriétés macroscopiques pareilles à celles de l'élément qu'ils constituent.	CA-ECT	Q01	a1, a2, a3, c1, c2, c3	1308 (66,0 %)
Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	CA-ECT	Q12	a1, a2, a3	229 (11,5 %)
		Q16	a3, b3, c3	218 (11,0 %)
Les éléments ont les mêmes propriétés que les composés qu'ils forment.	CA-ECT	Q08	a2, a3, c2	1011 (51,0 %)
Les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la substance qu'ils constituent.	Fr-SA	Q01	b2	256 (12,9 %)
L'évaporation entraîne une disparition de la matière.	Carence	Q15	a3, c2	413 (20,8 %)

Dans la section sur l'état de la matière, il a été démontré que les étudiants pouvaient croire que les molécules avaient une densité, manifestant ainsi une conception de type « Explication corpusculaire tautologique », c'est-à-dire qui attribue des propriétés macroscopiques aux particules sous-microscopiques. La présente recherche a permis de relever trois conceptions alternatives sur la nature corpusculaire de la matière qui font partie de la même catégorie. Les propriétés ainsi assimilées aux particules sont la couleur, la température de fusion et la friabilité (item Q01), la flexibilité (Q12) et la forme du cristal (Q16). Le pourcentage d'étudiants démontrant cette conception varie, allant jusqu'à atteindre 66,0 % à la question Q01. On est en présence d'une autre occurrence d'explication corpusculaire tautologique lorsque les étudiants attribuent aux éléments les propriétés des composés : par exemple, lorsqu'ils pensent que l'élément « chlore » est un solide, puisqu'ils sont habitués de voir du « chlore solide » utilisé pour l'entretien des piscines (chez 51,0 % des répondants). Comme on l'a vu précédemment dans les résultats de la phase pilote, cette conception alternative résulte peut-être de l'ignorance qu'ont les étudiants du véritable composé utilisé dans l'entretien des piscines (l'hypochlorite de calcium), mais cette réponse tend à montrer que placés devant un problème de chimie, les étudiants font souvent appel à leurs connaissances familières, et non au raisonnement analytique. C'est bien un exemple de l'emploi d'une conception alternative menant à une mauvaise réponse.

La simplification abusive « les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la substance qu'ils constituent » est peut-être née elle aussi d'une précaution à outrance. C'est incorrect d'un point de vue scientifique, car si une chose est conservée entre le niveau des substances (dans le domaine macroscopique) et le niveau des atomes (faisant partie du domaine sous-microscopique), c'est bien les propriétés de combinaison chimique. À la question Q01, 12,9 % des étudiants ont sélectionné la réponse correspondant à cette simplification abusive.

Enfin, une erreur à propos de la conservation de la matière a été également placée dans le tableau XXIII. Il s'agit de l'idée, très naïve, selon laquelle la matière qui s'évapore « disparaît », purement et simplement. Évidemment, la matière est toujours conservée dans un changement de phase ou une réaction chimique. Mais cette erreur, détectée chez 20,0 % des étudiants, découle peut-être d'une mauvaise lecture de l'énoncé de la question Q15, qui présentait la vue grossie d'un récipient après évaporation de l'eau qu'il contenait, précisant pourtant que le contenant était fermé. Si toutefois les étudiants croyaient réellement que la matière disparaissait, il s'agirait d'un obstacle de carence.

5.3.2.8 Difficultés conceptuelles sur la structure sous-microscopique des solides

La présente recherche a permis de détecter seulement deux difficultés conceptuelles sur la structure sous-microscopique des solides, ce petit nombre contrastant avec le grand pourcentage d'étudiants qui les ont manifestées, comme on le voit au tableau XXIV.

Tableau XXIV : Principales difficultés conceptuelles sur la structure sous-microscopique des solides

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	Fr-SA	Q18	b3, c2	1289 (65,0 %)
		Q12	b1, b2, b3	843 (42,5 %)
La structure de l'eau solide est surtout attribuable à des liaisons dipôle-dipôle.	CA-ImpFac	Q16	b1, c1	556 (28,0 %)

D'abord, une simplification abusive concernant la structure de l'eau solide a été relevée. Aux deux items où il était question de la glace (Q12 et Q18), de nombreux étudiants ont montré qu'ils se représentaient l'eau solide comme étant plus dense que l'eau liquide au niveau des molécules, c'est-à-dire que l'eau et « tous les solides ont une organisation moléculaire plus

compacte que les liquides ». C'est bien sûr une simplification abusive, puisque l'eau est une exception notable à cette « règle », les molécules d'eau étant plus espacées dans la glace que dans l'eau liquide. Bien que très répandue (entre 42,5 % et 65,0 % des répondants), ce n'est pas une difficulté très dramatique, puisqu'elle n'aurait probablement pas beaucoup d'impact sur les apprentissages subséquents en chimie; on peut aussi s'imaginer qu'elle peut se régler assez facilement par un enseignement direct sur le sujet (Bachelard, 1938, éd. 2004). C'est un exemple d'un aspect du modèle scientifique qui est non seulement moins familier aux étudiants, mais en plus contre-intuitif : en effet, il peut sembler plus logique aux étudiants de concevoir tous les solides comme des structures compactes que d'imaginer la glace comme une structure « pleine de trous », ce qu'elle est selon le modèle scientifique.

Enfin, la conception alternative sur l'eau solide de type « Importance relative des facteurs » se manifeste lorsque les étudiants (28,0 %) croient que « la structure de l'eau solide est surtout attribuable à des liaisons dipôle-dipôle », alors qu'elle est en réalité surtout attribuable aux liaisons hydrogène. Il a été abordé précédemment, à la section « Conceptions alternatives sur les liaisons chimiques », cette confusion entre dipôle-dipôle et ponts H faisant partie du cadre alternatif de la liaison chimique.

5.3.3 Corrélations entre les difficultés conceptuelles

Comme les items du test « Molécules, polarité et phénomènes » dont les résultats viennent d'être présentés concernent des sujets qui sont sinon directement liés entre eux, du moins connexes, il était intéressant d'établir des corrélations entre les scores pondérés (le score de chaque question) et le score pondéré total (le score au test complet). Le tableau suivant présente ces corrélations¹³.

¹³ Il est à noter que l'indice de corrélation choisi, le r de Pearson, a été préféré à l'alpha de Cronbach parce que l'ensemble du MPP ne sert pas qu'à mesurer une seule caractéristique. En effet, les différents items du MPP tracent un portrait large de la compréhension conceptuelle en chimie, et ne se concentrent pas sur un seul sujet. Ainsi, l'alpha de Cronbach, qui vise plutôt à assurer la cohérence interne d'un instrument mesurant une seule dimension, n'est pas l'indice le plus approprié pour ce test (Howell, 2007).

Tableau XXV : Coefficients de corrélation entre le score pondéré de chaque item et le score pondéré total

Item	Corrélation de Pearson	Item	Corrélation de Pearson
Q01	0,305	Q11	0,260
Q02	0,209	Q12	0,315
Q03	0,354	Q13	0,335
Q04	0,326	Q14	0,386
Q05	0,425	Q15	0,465
Q06	0,221	Q16	0,291
Q07	0,320	Q17	0,385
Q08	0,303	Q18	0,292
Q09	0,295	Q19	0,249
Q10	0,319	Q20	0,284

Ces corrélations sont moyennes, mais toutes significatives ($p < 0,01$ dans tous les cas). Il semble ne pas y avoir d'association forte entre la performance à une question donnée et le score au test complet. La faiblesse de ces corrélations pourrait être interprétée relativement à l'étendue du test, qui couvre de nombreux sujets de chimie et vise à détecter plusieurs difficultés conceptuelles. En ce sens, le test permet de recueillir des informations précieuses sur les conceptions des étudiants québécois et leurs autres obstacles, mais les résultats ne semblent pas pouvoir être interprétés pour établir des profils de répondants.

On peut observer une corrélation entre certaines questions qui vérifient une même difficulté conceptuelle. Par exemple, les items Q12 et Q18 vérifiaient tous les deux la simplification abusive « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides ». La figure 18 présente tous les répondants qui ont démontré cette simplification abusive à Q12 ou à Q18, ainsi que ceux qui la démontraient à Q12 et à Q18, ce qui se trouve à être l'intersection du diagramme.

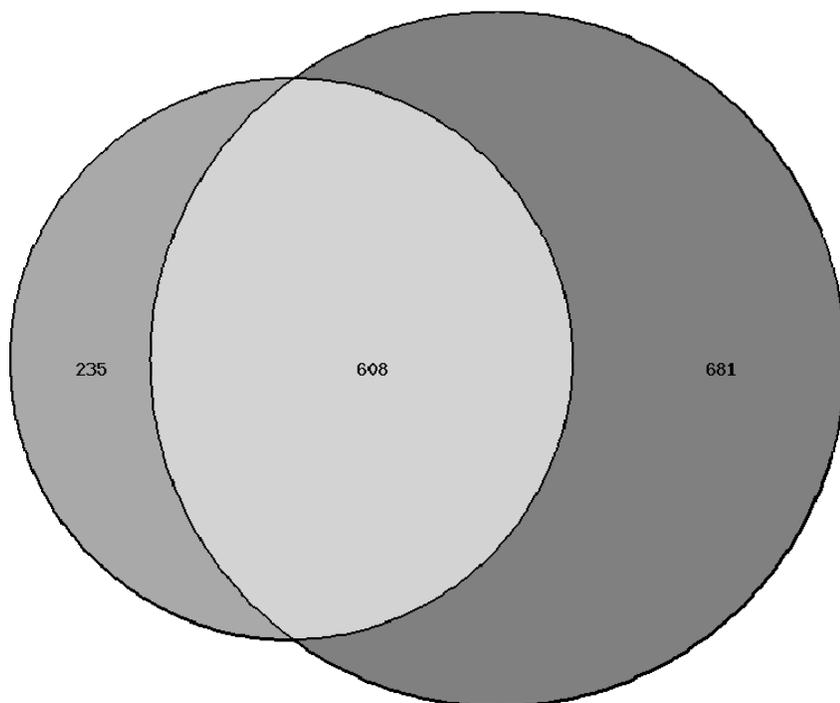


Figure 18 : Diagramme de Venn pour la simplification abusive « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides » (Q12 et Q18)

L'intersection du diagramme compte 608 répondants, ce qui veut dire que 608 étudiants ont choisi la réponse associée à la simplification abusive « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides » à la fois dans l'item Q12 et dans l'item Q18.

À l'item Q12, cette difficulté conceptuelle correspondait à trois choix de réponses (soit les choix b1, b2 et b3). À l'item Q18, seuls deux choix de réponses (b3 et c2) menaient à l'identification de cette difficulté conceptuelle. Autrement dit, les étudiants qui ont choisi l'option b) au premier palier à l'item Q12 sont directement les 843 étudiants (235 + 608) comptés à la figure 18, alors que les 1289 étudiants montrant cette conception à l'item Q18 (608 + 681) se séparent en deux combinaisons de choix de réponse. On ne peut pas négliger le fait que la façon dont le questionnaire MPP a été construit influence la façon dont les étudiants se répartissent à la figure 18. En effet, en répondant au MPP, un étudiant ne peut pas choisir sa réponse parmi les neuf choix de réponse existants dans les deux paliers : il est contraint de choisir d'abord une réponse au premier palier, et ensuite de faire un choix parmi les trois justifications qui lui sont proposées à la suite de son choix au premier palier.

Considérons les 608 étudiants qui ont choisi l'option b) au premier palier à l'item Q12 et qui ont par la suite, arrivés à l'item Q18, ont choisi la combinaison b3 ou c2. Ce faisant, ce sont les énoncés suivants que ces étudiants ont choisis comme étant vrais :

- Il y a plus d'espace entre les molécules dans le liquide que dans le solide (option b de Q12).
- Les molécules dans l'eau solide sont plus rapprochées les unes des autres que dans l'eau liquide (justification des combinaisons b3 et c2 de Q18).

Choisir à la fois l'un et l'autre de ces énoncés est très cohérent : si on pense en effet que « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides », ces deux énoncés paraissent vrais. On pourrait se demander, alors, pourquoi certains étudiants ayant choisi l'option b dans Q12 ont choisi *autre chose* à l'item Q18. En fait, l'item Q18 visait à repérer des difficultés conceptuelles variées, comme chaque item du MPP. Devant d'autres options, les étudiants ne choisissent peut-être pas toujours la réponse la plus cohérente avec leurs réponses antérieures, parce qu'ils sont aux prises avec d'autres difficultés conceptuelles. La consigne donnée aux étudiants pour répondre au MPP est de choisir la meilleure option selon eux. Ainsi, une combinaison réponse/justification menant à l'identification d'une difficulté conceptuelle à un item ne garantit pas nécessairement que cette même difficulté conceptuelle se manifesterait dans un autre item, qui chercherait cette difficulté parmi d'autres.

D'autres difficultés conceptuelles se manifestent de façon moins cohérente d'une question à l'autre. La figure 19 illustrant la corrélation entre une simplification abusive observée dans les items Q09 et Q19 présente un de ces cas.

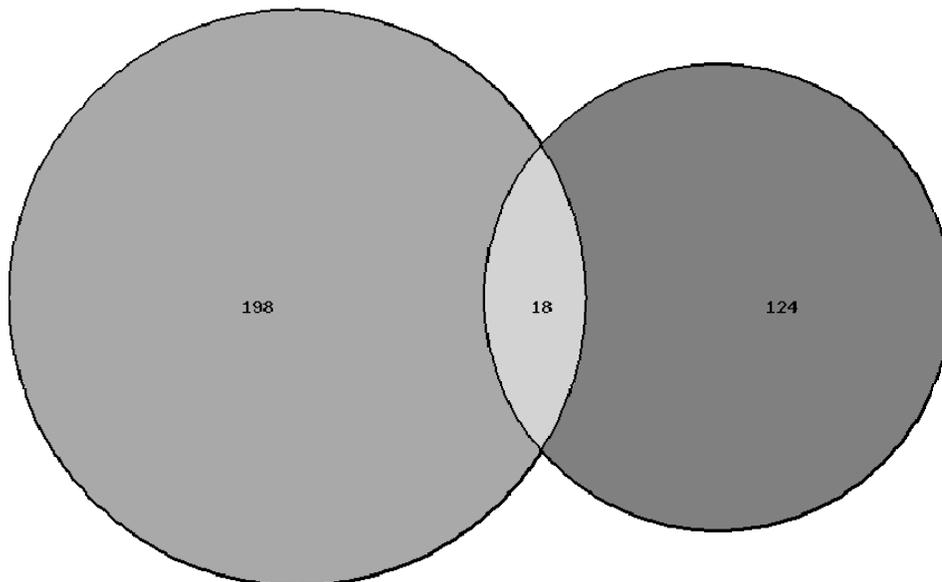


Figure 19 : Diagramme de Venn pour la simplification abusive « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire » (Q09 et Q19)

Dans ce diagramme, on voit que l'intersection est petite pour la simplification abusive « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire ». Est-ce que cette difficulté conceptuelle est moins cohérente que la précédente chez les étudiants? Encore une fois, il est pertinent de regarder le nombre de combinaisons réponse/justification qui mènent à l'identification de cette difficulté conceptuelle : pour l'item Q09, seule l'option a1 est associée à cette simplification abusive. Pour l'item Q19, ce n'est que l'option b3. Ainsi, pour être à l'intersection, il fallait que les étudiants choisissent a1 à Q09, puis b3 à Q19. Comme ces deux items cherchent à mettre en lumière plusieurs difficultés conceptuelles, et comme c'était le cas pour l'exemple précédemment présenté à la figure 18, des étudiants qui pensent qu'en effet « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire » pouvaient avoir choisi, au premier palier de l'item Q19, l'option a) ou c), qui ne pouvaient pas mener à b3 et à l'identification de cette difficulté conceptuelle à nouveau.

Comme le questionnaire MPP n'était pas développé pour mesurer plus d'une fois la même difficulté conceptuelle, il est difficile de juger de la cohérence des difficultés conceptuelles qu'il met en lumière. Pour vérifier si une telle cohérence existe bien, il faudrait utiliser un instrument spécialement conçu pour ce faire, par exemple un instrument dans lequel

les difficultés conceptuelles cherchées seraient visées par plusieurs items, et pour lesquelles les choix de réponses menant à leur identification soient tous accessibles aux étudiants.

Une autre raison qui expliquerait le manque de cohérence apparente de certaines difficultés conceptuelles réside peut-être dans le contexte de la question. En effet, si elle comporte un indice saillant reconnu par les étudiants, si elle présente un schéma, ou simplement si la façon dont elle est posée est plus familière aux étudiants, la question elle-même peut aussi avoir une grande influence sur l'apparence de cohérence entre les réponses. Encore une fois, ces considérations intéressantes pourraient être étudiées plus avant dans une recherche ultérieure.

Même si le contexte de la présente recherche ne comporte pas ces caractéristiques, il est intéressant, avec les données disponibles, de voir malgré tout que certaines difficultés semblent s'exprimer de façon assez cohérente dans les réponses des étudiants. C'était le cas de la simplification abusive « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides » dont l'intersection était présentée à la figure 18. La corrélation entre les étudiants qui ont montré cette difficulté conceptuelle à l'item Q12 et ceux qui l'ont montrée à l'item Q18 est significative ($\chi^2 = 32,685$, $p < 0,001$), et le coefficient ϕ pour ce tableau de contingence est de $0,128^{14}$, ce qui signifie qu'il y a une corrélation – bien que l'association soit plutôt faible – dans l'expression de cette simplification abusive à l'item Q12 et à l'item Q18. Au contraire, l'exemple présenté à la figure 19 ne montre pas de corrélation significative entre la manifestation de la simplification abusive « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire » aux items Q09 et Q19, probablement pour les raisons discutées plus haut ($\chi^2 = 0,501$, $p = 0,484$, $\phi = 0,016$).

Le tableau XXVI qui suit présente la proportion d'intersection et le coefficient de corrélation ϕ pour les difficultés conceptuelles qui pouvaient être détectées par plus d'une question et dont il a été question précédemment.

¹⁴ Le coefficient de corrélation ϕ s'interprète de la même façon que les autres coefficients de corrélation de la famille des « r », dont il fait partie (Howell, 2007).

Tableau XXVI : Proportion d'intersection pour les difficultés conceptuelles relevées dans plus d'un item

Difficultés conceptuelles	Catégorie	Dans les items	%	Prop. d'intersect.	Corrélation (ϕ)
Argument non polaire pour polaire.	Ag-ArgOpp	Q05 n Q07	12,4 et 9,5	0,446	0,383*
Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	Fr-SA	Q12 n Q18	42,5 et 65,0	0,570	0,128*
Tout regroupement d'atomes est une molécule.	Fr-SA	Q02 n Q20	78,9 et 50,5	0,640	0,075*
Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	CA-ECT	Q08 n Q14	11,0 et 5,5	0,159	0,070*
Une molécule est formée de non-métaux.	Fr-DR	Q02 n Q20	4,0 et 3,5	0,095	0,060*
L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	CA-PcomC	Q14 n Q15	61,6 et 42,8	0,532	0,058*
Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	Fr-DR	Q07 n Q09	24,1 et 15,2	0,154	0,041
Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	CA-ECT	Q12 n Q16	11,5 et 11,0	0,143	0,034
Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	Fr-DR	Q11 n Q17	6,9 et 16,4	0,115	0,030
La forme d'une molécule est due à sa polarité.	CA-Conn	Q02 n Q16	7,6 et 13,9	0,070	0,029
Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	Fr-SA	Q13 n Q17	22,7 et 39,2	0,305	0,026
L'intensité des liaisons intermoléculaires (et non l'énergie cinétique des molécules) explique l'état de la matière.	CA-Conn	Q12 n Q18	3,5 et 9,0	0,073	0,026
Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	Fr-SA	Q09 n Q19	10,9 et 7,2	0,100	0,016
Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	CA-PcomC	Q10 n Q19	19,3 et 3,2	0,054	0,001

* Valeurs du coefficient ϕ pour lesquelles le χ^2 est significatif à sig. < 0,01.

La proportion d'intersection entre deux items pointant vers la même difficulté conceptuelle a été calculée de la façon suivante :

$$\text{Proportion d'intersection} = \frac{\text{Nombre de répondants dans l'intersection}}{\text{Moyenne des répondants dans chaque ensemble}}$$

Ce paramètre prend une valeur entre 0 (aucune intersection) et 1 (les deux ensembles sont complètement superposés). Dans le même tableau sont présentés les coefficients de

corrélation ϕ , calculés pour des tests de χ^2 réalisés sur chaque paire d'items montrant la même difficulté conceptuelle.

Les six premières difficultés conceptuelles répertoriées dans le tableau XXVI montrent une corrélation significative à $p < 0,01$. Les étudiants qui croient que les énoncés de ces six difficultés conceptuelles sont exacts semblent ainsi significativement le croire en répondant à deux items différents. Pour les autres difficultés répertoriées dans ce tableau, il n'est pas possible de conclure sur la cohérence de ces difficultés dans l'esprit des étudiants qui ont répondu au MPP.

Il est intéressant de noter que, parmi les difficultés montrant de la cohérence chez les étudiants, on trouve l'agencement incorrect « non polaire pour polaire », ce qui s'interprète aisément : les étudiants qui croient que non polaire veut dire polaire le croient durant tout le test, et probablement aussi à l'extérieur de celui-ci. Bien que ces étudiants ne soient pas nombreux, une telle observation appelle la nécessité d'une intervention délibérée en classe pour permettre à tous les étudiants de comprendre cette notion au centre de la relation entre le domaine sous-microscopique et le domaine macroscopique de la matière.

On remarque aussi, parmi les six difficultés dont la corrélation entre plusieurs questions est significative, qu'il y a l'obstacle de fragmentation extrêmement répandu selon lequel « tout regroupement d'atomes est une molécule ». Cette observation aussi appelle à une meilleure distinction entre les composés moléculaires et les autres, puisque le concept de molécule est absolument fondamental en chimie, non seulement d'un point de vue descriptif, mais surtout pour prédire et expliquer la réactivité des composés.

5.4 Difficultés conceptuelles changeant dans le temps... ou non

5.4.1 Difficultés conceptuelles résistantes au changement

Pour en revenir à la variable, décrite plus tôt, classant les étudiants dans quatre sous-échantillons selon les cours qu'ils avaient suivis et réussis au moment de répondre au MPP (voir à la page 151), il est intéressant de voir quelles conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles sont celles qui semblent le plus perdurer, malgré le nombre de cours suivis, soit les difficultés desquelles on pourrait dire qu'elles sont les plus résistantes.

Une analyse de variance multivariée (MANOVA) a été faite entre les quarante-huit difficultés conceptuelles observées¹⁵ et les sous-échantillons (P_0 , P_1 , P_2 ou P_3) d'étudiants. Cette analyse s'est avérée significative, ce qui signifie que certaines conceptions et autres difficultés conceptuelles varient en fréquence chez les étudiants de certains sous-échantillons (trace de Hotelling = 0,330, $ddl = 144$, $sig. < 0,01$).

Ce ne sont toutefois pas toutes les difficultés dont la fréquence varie en fonction du sous-échantillon. Un test post-hoc (Waller-Duncan) a permis de trouver quelles difficultés ne varient pas en fréquence selon le sous-échantillon d'étudiants. Dans le tableau XXVIII, on voit les difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants sont semblables, sans égard au sous-échantillon (P_0 , P_1 , P_2 ou P_3) auquel ils appartiennent.

¹⁵ Seules les difficultés observées chez 10 % ou plus d'étudiants ont été considérées à cette étape, comme expliqué précédemment (voir à la page 145).

Tableau XXVII : Conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants sont semblables, sans égard aux cours de chimie suivis et réussis au moment de répondre au MPP

Sujet	Difficulté conceptuelle	Catégorie	Pourcentage de répondants				D	Sig.
			P ₀	P ₁	P ₂	P ₃		
1— Notion de molécule	Une molécule est formée d'atomes liés par des liaisons covalentes.	Fr-DR	15,5 %	12,8 %	12,0 %	10,4 %	0,150	0,929
2— Forme des molécules	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les doublets libres.	Fr-DR	25,2 %	21,7 %	25,8 %	24,4 %	1,891	0,129
2— Forme des molécules	Erreur dans la prédiction de la forme d'une molécule OU Erreur dans l'addition vectorielle.	Carence	54,4 %	58,6 %	59,4 %	61,6 %	0,496	0,685
3— Polarité	Argument non polaire pour polaire.	Ag-ArgOpp	13,6 %	11,5 %	12,6 %	14,6 %	0,607	0,610
3— Polarité	Erreur dans l'addition vectorielle.	Carence	19,4 %	15,1 %	17,2 %	18,9 %	0,944	0,418
3— Polarité	La forme d'une molécule est causée par sa polarité.	CA-Conn	21,4 %	28,7 %	25,4 %	32,3 %	0,982	0,400
3— Polarité	Erreur dans la prédiction de la polarité d'une molécule (sans pouvoir identifier la raison).	Carence	27,2 %	22,9 %	20,3 %	20,1 %	1,263	0,285
3— Polarité	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	Fr-DR	17,5 %	27,5 %	24,8 %	24,4 %	1,980	0,115
3— Polarité	Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	Fr-SA	18,4 %	13,9 %	13,9 %	11,0 %	1,825	0,140
3— Polarité	Erreur dans la prédiction de la polarité d'un composé (sans pouvoir identifier la raison).	Carence	17,5 %	24,8 %	28,5 %	26,2 %	2,382	0,068
4— Liaisons chimiques	Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	Fr-SA	10,7 %	12,9 %	11,5 %	15,9 %	1,203	0,307
4— Liaisons chimiques	Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	Fr-SA	22,3 %	27,8 %	29,5 %	25,6 %	0,199	0,897
4— Liaisons chimiques	Les liaisons chimiques sont nécessairement représentées par des bâtonnets.	Carence	10,7 %	10,7 %	9,2 %	11,0 %	0,434	0,729
5— État de la matière	Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	CA-ECT	13,6 %	12,0 %	14,2 %	11,0 %	1,153	0,326
6— Solubilité et mise en solution	Aucune liaison intermoléculaire n'est formée ni brisée lors de la mise en solution.	Fr-SA	67,0 %	66,5 %	65,0 %	67,1 %	1,366	0,252
6— Solubilité et mise en solution	Il n'y a pas de liaisons intermoléculaires entre les molécules dans une solution.	CA-CcomP	19,4 %	19,7 %	19,8 %	14,6 %	0,541	0,654
6— Solubilité et mise en solution	La formation de ponts H avec l'eau suffit pour qu'un composé y soit très soluble.	CA-ImpFac	48,5 %	49,9 %	53,2 %	47,6 %	2,097	0,099
6— Solubilité et mise en solution	La mise en solution de composés moléculaires se solde en la réorganisation du solvant et du soluté en de nouveaux composés.	CA-PcomC	15,5 %	11,0 %	10,8 %	5,5 %	0,969	0,407
6— Solubilité et mise en solution	Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	CA-PcomC	61,2 %	51,3 %	52,6 %	53,0 %	0,840	0,472
6— Solubilité et mise en solution	Les liaisons covalentes se brisent lors de la mise en solution.	CA-PcomC	11,7 %	10,6 %	11,5 %	12,2 %	2,434	0,063

Tableau XXVII [suite]

Sujet	Conception alternative	Catégorie	Pourcentage de répondants				D	Sig.
			P ₀	P ₁	P ₂	P ₃		
6— Solubilité et mise en solution	Lors de la mise en solution, des liaisons intermoléculaires se forment entre les particules de solvant et de soluté, mais aucun lien n'est brisé.	Fr-DR	11,7 %	15,3 %	13,4 %	17,1 %	0,899	0,441
7— Nature corpusculaire de la matière	Les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la substance qu'ils constituent.	Fr-SA	11,7 %	9,9 %	11,4 %	14,6 %	0,795	0,497
7— Nature corpusculaire de la matière	Les atomes ont des propriétés macroscopiques pareilles à celles de l'élément qu'ils constituent.	CA-ECT	15,5 %	14,1 %	14,8 %	15,9 %	0,186	0,906
7— Nature corpusculaire de la matière	Les éléments ont les mêmes propriétés que les composés qu'ils forment.	CA-ECT	43,7 %	35,5 %	37,3 %	29,9 %	1,007	0,389
8— Structure sous-microscopique des solides	Explication téléologique.	Carence	17,5 %	15,7 %	14,4 %	20,1 %	1,226	,299
8— Structure sous-microscopique des solides	La structure de l'eau solide est surtout attribuable à des liaisons dipôle-dipôle.	CA-ImpFac	8,7 %	9,7 %	11,6 %	15,2 %	0,994	0,395

On voit que plusieurs difficultés conceptuelles décelées par la présente recherche semblent résister au changement, puisqu'on les retrouve chez sensiblement le même pourcentage d'étudiants, peu importe le nombre de cours de chimie qu'ils ont réussis au cégep. Certaines de ces difficultés sont issues de demi-raisonnements et concernent les molécules ou la polarité; d'autres découlent de simplifications abusives à propos de la polarité, des liaisons chimiques ou de la nature corpusculaire de la matière. D'autres sont des erreurs logiques, des conceptions alternatives ou des carences manifestes. Autrement dit, il y a, pour vingt-six difficultés conceptuelles, peu d'apprentissages au fur et à mesure que les étudiants suivent de plus en plus de cours pour une certaine proportion des étudiants. Comme il a été expliqué dès le chapitre 1 de la présente thèse, il est souvent rapporté que les conceptions alternatives sont résistantes au changement (Astolfi et coll., 2008; Çalik et coll., 2010; Fetherstonhaugh & Treagust, 1992; Hewson & Hewson, 1984; Wandersee et coll., 1994). Les résultats de la présente recherche tendent à confirmer cette idée, à la fois pour certaines conceptions alternatives et pour d'autres difficultés conceptuelles qui ont ici été nommées les demi-raisonnements, les simplifications abusives, les carences et les erreurs logiques. Comme ce ne sont pas toutes les difficultés conceptuelles qui montrent cette résistance au changement, par contre, il est intéressant de les regarder d'un peu plus près avant de passer à celles qui, elles, sont observées à des fréquences différentes au fur et à mesure que les étudiants suivent de plus en plus de cours de chimie.

D'abord, il est intéressant de voir qu'un agencement incorrect, l'argument opposé sur la polarité, semble peu varier à travers le parcours collégial des étudiants, laissant penser que le raisonnement formel n'est pas spécifiquement développé pour tous les étudiants en sciences, une observation qui a déjà été rapportée (Torkia-Lagacé, 1981).

Trois des conceptions qui ne varient pas sont des idées très naïves : les molécules s'évaporent difficilement si elles sont lourdes, les atomes ont les mêmes propriétés que la matière macroscopique et les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la matière macroscopique; ce sont toutes trois des explications corpusculaires tautologiques (CA-ECT). Le nombre d'étudiants qui ont ces idées très naïves demeure assez constant à travers les deux ans du programme de sciences.

Les difficultés conceptuelles très fréquentes sur la solubilité et la mise en solution interpellent encore plus, lorsqu'on voit jusqu'à quel point elles sont fréquentes. Les conceptions alternatives « Physique vu comme chimique » (et sa contrepartie « Chimique vu comme physique ») se manifestent spécialement ici. La mise en solution semble poser un problème conceptuel aux étudiants, et ce peu importe s'ils ont fait et réussi le deuxième cours de chimie (dans les sous-échantillons P_2 et P_3), qui s'intitule pourtant Chimie des solutions, et dans lequel les sujets traités concernent effectivement principalement le comportement de solutions. Une explication de ce manque de progression conceptuelle réside peut-être dans le fait que les cours de chimie au cégep traitent plutôt des solutions en tant que telles, en passant rapidement sur le processus de la mise en solution. Toutefois, le concept de solubilité en lui-même est l'un des plus ubiquitaires des trois premiers cours de chimie du programme de sciences. Comme la mise en solution est peu décrite par les enseignants et les manuels, mais souvent invoquée indirectement lors de discussions sur les solutions, le chemin est tout tracé pour que les étudiants se construisent des modèles explicatifs alternatifs du processus. C'est probablement pour cette raison que ces conceptions sont développées dans l'esprit des étudiants, et parce qu'elles ne sont pas remises en question par l'enseignement qu'elles sont persistantes.

La polarité fait aussi pâle figure dans le tableau XXVII, où on voit que sept difficultés conceptuelles ne changent pas en fréquence dans le parcours collégial. Pourtant, les pourcentages d'étudiants qui témoignent de ces difficultés sont somme toute assez faibles, sous la barre des 30 %, montrant que ces difficultés ne changent pas, mais seulement pour une petite proportion des étudiants.

5.4.2 Difficultés conceptuelles dont la fréquence diminue à travers les études

Le tableau XXIX qui suit, à la page 188, présente quant à lui les difficultés conceptuelles pour lesquelles on observe au contraire une différence entre les étudiants des quatre sous-échantillons, c'est-à-dire pour lesquelles il y a une diminution de la fréquence.

Tableau XXVIII : Conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants diminuent au fur et à mesure qu'ils réussissent davantage de cours de chimie au cégep

Sujet	Conception alternative	Catégorie	Pourcentage de répondants				D	Sig.
			P ₀	P ₁	P ₂	P ₃		
1— Notion de molécule	Tout regroupement d'atomes est une molécule.	Fr-SA	89,3 %	89,8 %	87,0 %	82,3 %	2,845	0,036
2— Forme des molécules	La forme d'une molécule est causée par la présence ou l'absence de doublets libres sur l'atome central.	Fr-DR	21,4 %	21,6 %	13,3 %	6,7 %	11,888	< 0,001
2— Forme des molécules	Une molécule a la forme de sa structure de Lewis.	Fr-SA	35,9 %	29,7 %	17,2 %	12,8 %	19,356	< 0,001
2— Forme des molécules	Une molécule symétrique est linéaire.	Fr-SA	8,7 %	16,1 %	8,6 %	6,7 %	9,951	< 0,001
2— Forme des molécules	Les liaisons hydrogène donnent la forme à la molécule.	CA-Conn	35,0 %	32,9 %	21,5 %	22,6 %	10,994	< 0,001
3— Polarité	Une liaison double est plus polaire qu'une liaison simple.	Fr-DR	26,2 %	16,9 %	19,4 %	24,4 %	3,062	0,027
4— Liaisons chimiques	Les liaisons intermoléculaires sont les liaisons à l'intérieur des molécules.	Fr-SA	51,5 %	51,2 %	49,1 %	39,0 %	2,825	0,037
4— Liaisons chimiques	Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	Fr-DR	21,4 %	18,8 %	14,2 %	11,0 %	4,065	0,007
4— Liaisons chimiques	Erreur dans l'identification des molécules faisant des liaisons hydrogène (certaines en font, mais l'étudiant dit qu'elles n'en font pas).	Carence	26,2 %	23,9 %	16,1 %	9,8 %	10,075	< 0,001
5— État de la matière	L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	CA-PcomC	75,7 %	78,4 %	76,4 %	68,3 %	2,669	0,046
6— Solubilité et mise en solution	La mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant.	CA-CcomP	14,6 %	12,6 %	10,6 %	3,7 %	4,214	0,006
6— Solubilité et mise en solution	La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à l'ionisation.	CA-ImpFac	61,2 %	56,5 %	52,1 %	32,9 %	11,463	< 0,001
7— Nature corpusculaire de la matière	Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	CA-ECT	24,3 %	23,4 %	18,2 %	18,9 %	2,678	0,046
7— Nature corpusculaire de la matière	Méconnaissance d'éléments communs.	Carence	28,2 %	24,4 %	18,6 %	19,5 %	3,829	,009
8— Structure sous-microscopique des solides	Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	Fr-SA	53,4 %	50,0 %	42,4 %	45,7 %	3,971	0,008

On parle ici de diminution de fréquences lorsque la proportion d'étudiants qui ont des difficultés conceptuelles est plus faible pour les sous-échantillons ayant suivi et réussi plus de cours de chimie. Un test post-hoc (Duncan-Waller) permet de distinguer que c'est généralement le sous-échantillon P_3 qui présente une différence significative avec les trois autres sous-échantillons (présentant une fréquence de difficultés conceptuelles plus faible), tandis que pour d'autres cas, c'est le sous-échantillon P_2 qui présente une fréquence de difficultés conceptuelles significativement plus faible que les sous-échantillons P_0 et P_1 , même s'il ne se distingue pas significativement du sous-échantillon P_3 . Ces deux situations représentent ce qui est interprété ici comme une diminution en fréquence au fur et à mesure que plus de cours de chimie sont réussis.

Premièrement, parmi les difficultés qui diminuent au fil des cours de chimie réussis, on note la simplification abusive la plus fréquente de toutes celles répertoriées ici, celle sur la notion de molécule. On voit qu'en effet, le pourcentage d'étudiants diminue, mais il reste tout de même de plus de 80 % même chez les étudiants de P_3 . Il demeure donc que cette conception est très préoccupante.

On voit ensuite que la plupart des difficultés conceptuelles sur la forme des molécules diminuent avec l'avancement dans les études. Ce résultat est encourageant, montrant que les difficultés des étudiants avec la géométrie moléculaire ne sont peut-être que transitoires, et se résolvent d'elles-mêmes à travers l'enseignement traditionnel, probablement au fur et à mesure que les étudiants sont mis en contact avec de nombreuses molécules, dans des contextes variés. On peut postuler que les étudiants qui ont fait le cours de chimie organique ont développé une représentation à la fois tridimensionnelle et dynamique de la molécule en tant qu'objet. C'est probablement ce modèle mental plus développé qui explique la baisse de fréquence des difficultés sur les liaisons chimiques et la nature corpusculaire de la matière.

Deux conceptions alternatives sur la solubilité et la mise en solution diminuent aussi en fréquence. On a vu au tableau précédent, par contre, que sept autres difficultés conceptuelles sur le même sujet demeureraient aussi fréquentes chez les étudiants de P_3 . Peut-être qu'une forme de progression d'apprentissage est en train de s'installer chez ces étudiants, mais qu'ils gardent quand même plusieurs conceptions alternatives et autres obstacles dans leurs modèles mentaux. Cette observation est très pertinente et importante pour les enseignants, qui doivent garder en

tête que leurs étudiants éprouvent des difficultés conceptuelles avec ce processus fondamental pour expliquer la réactivité des composés.

La conception très préoccupante sur le bris des liaisons covalentes lors du passage en phase vapeur semble elle aussi diminuer en fréquence à mesure que davantage de cours sont réussis par les étudiants. Cette observation est assez réconfortante, en particulier au regard des justifications ouvertes vues lors de la phase pilote de cette recherche, et qui laissaient croire que tous les étudiants pouvaient manifester cette conception très nuisible à l'apprentissage (voir la section 5.2.2.3 « Quelques justifications d'étudiants : le changement de phase »). Toutefois, il ne faut certainement pas crier victoire : il demeure que plus de 70 % des étudiants ayant participé à cette recherche ont manifesté cette conception alternative. La même précaution que celle qui s'appliquait pour la conception sur la notion de molécule devrait être exercée ici : on est face à une conception extrêmement répandue, et le fait qu'elle diminue d'une dizaine de points de pourcentage pendant les études collégiales ne peut pas être considéré comme un succès d'enseignement.

5.4.3 Difficultés conceptuelles dont la fréquence augmente à travers les études

Plus étranges sont les difficultés conceptuelles qui sont plus fréquentes chez les étudiants de P_3 que ceux de P_0 , présentées au tableau XXX. Il s'agit de difficultés sur la forme des molécules, sur les liaisons chimiques (les liaisons intermoléculaires, en particulier) et sur la solubilité.

La première, celle selon laquelle la forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les atomes périphériques, est un demi-raisonnement. Elle est à peu près équivalente à la suivante, selon laquelle la forme ne serait due qu'à la répulsion entre les électrons liants (ce qui ne considère encore une fois que la même moitié du raisonnement). L'autre moitié du raisonnement, soit que la forme est causée par la répulsion entre les doublets libres, ne change pas selon le nombre de cours réussis, et était présentée au tableau XXVIII. Il semble donc que le principe explicatif de la forme des molécules (la théorie de la RPEV) n'est pas maîtrisé après les premiers cours de chimie, et que les étudiants ayant réussi le cours de chimie organique peuvent même être plus incertains à ce propos que les autres.

Tableau XXIX : Conceptions alternatives et autres difficultés conceptuelles pour lesquelles les proportions d'étudiants augmentent au fur et à mesure qu'ils réussissent davantage de cours de chimie au cégep

Sujet	Conception alternative	Catégorie	Pourcentage de répondants				D	Sig.
			P ₀	P ₁	P ₂	P ₃		
2— Forme des molécules	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les atomes périphériques.	Fr-DR	24,3 %	17,8 %	22,9 %	27,4 %	3,996	0,008
2— Forme des molécules	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les électrons liants ET les liaisons ne se repoussent que lorsqu'elles sont polaires.	Fr-DR	15,5 %	13,6 %	19,7 %	17,1 %	3,902	0,009
2— Forme des molécules	La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide.	CA-Conn	20,4 %	10,9 %	40,7 %	59,1 %	100,143	< 0,001
4— Liaisons chimiques	L'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement causée par la taille des molécules.	Fr-DR	11,7 %	9,1 %	10,5 %	16,5 %	2,731	0,042
5— État de la matière	L'évaporation entraîne une disparition de la matière.	Carence	21,4 %	17,5 %	22,2 %	31,7 %	6,342	< 0,001
6— Solubilité et mise en solution	La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à la polarité.	CA-ImpFac	7,8 %	9,6 %	15,5 %	21,3 %	8,984	< 0,001

Une interprétation possible de cette situation paradoxale est que, bien que les étudiants du cours de chimie organique gagnent une représentation tridimensionnelle et dynamique des molécules, comme mentionné plus tôt, ils sont aussi victimes de leur expérience : en effet, les molécules organiques avec lesquelles ils travaillent quotidiennement sont généralement des molécules qui ne présentent pas de doublets libres, ou enfin, pas de doublets libres sur les atomes centraux, qui sont très généralement des atomes de carbone (qui ne portent pas de doublet libre lorsqu'ils ne sont pas chargés). Comme il avait été fait question précédemment, au chapitre 2, le type de raisonnement en chimie qui s'appuie sur l'expérience de cas est favorisé par les experts, mais peut mener, comme ici, à des biais systématiques lorsque l'expérience du contenu n'est pas assez vaste (Christian et Talanquer, 2012).

La troisième difficulté dont la fréquence augmente au fur et à mesure que plus de cours de chimie sont suivis concerne elle aussi la forme des molécules et c'est celle qui augmente le plus significativement. Il s'agit de la conception alternative, classée comme « connexion » (CA-Conn) selon laquelle la molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide. Il est tout à fait impressionnant de voir qu'elle est en fait significativement plus fréquente chez les étudiants de P_2 (comparé à P_0 et P_1), puis encore significativement plus fréquente chez les étudiants de P_3 (comparé à tous les autres sous-échantillons). Durant la phase pilote, elle avait aussi été très souvent observée chez les étudiants universitaires du baccalauréat en chimie qui y avaient répondu. Il semble que cette confusion quant à la connexion d'idées conceptuelles proches tend à augmenter à mesure que les étudiants gagnent en expérience. C'est très certainement relié, encore une fois, à la construction de plus en plus détaillée que les étudiants d'organique développent des molécules, et en particulier ici de la géométrie particulière et somme toute étrange et inhabituelle des alcynes, cette classe de composés organiques qui ont une liaison triple. Il faut garder en tête que les étudiants de P_2 ont suivi et réussi les deux premiers cours de chimie et qu'ils répondent au test pendant qu'ils suivent le cours de chimie organique. Ils avaient donc probablement étudié ou au moins vu les alcynes au moment où ils ont répondu au test, ce qui montre, encore une fois, que l'expérience de cas peut être un mode de raisonnement qui conduit à une mauvaise réponse ou une mauvaise explication lorsque l'expérience est en fait teintée de conceptions alternatives.

La quatrième difficulté présentée dans le tableau XXIX est à propos des liaisons intermoléculaires. Les étudiants qui démontrent cette difficulté croient que l'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement causée par la taille des molécules. C'est encore une fois un demi-raisonnement, l'autre demi-raisonnement étant que l'intensité de ces liaisons est aussi due à la polarité des molécules. Cet autre demi-raisonnement ne faisait pas partie du MPP, il est donc impossible de vérifier s'il évolue de la même façon que celui-ci. Quoi qu'il en soit, cette difficulté conceptuelle se manifeste peut-être plus chez les étudiants qui ont suivi le cours de chimie organique, parce que durant ce cours, il peut arriver que, par souci de frugalité, on se contente d'un raisonnement en raccourci qui ne considère que la taille des molécules d'une polarité semblable pour juger de l'état des substances. En réalité, dans le MPP, cette conception était mesurée par l'item Q11. On y demandait quelle molécule faisait les liaisons intermoléculaires les plus fortes, entre SiF_4 et SO_2 (et H_2Se , choisi par une minorité d'étudiants). La plupart des étudiants qui ont manifesté cette conception, à la suite de leur réponse à la question Q11, ont peut-être mal prédit la forme de la bonne réponse de cet item, SO_2 , qu'ils ont peut-être vu comme une molécule linéaire. Dans ce cas, il faudrait considérer leur conception comme étant « une molécule a la forme de sa structure de Lewis ». Il est toutefois impossible de vérifier ceci par les résultats de la phase principale de l'étude.

Une représentation très naïve de l'évaporation, soit la carence « l'évaporation entraîne une disparition de la matière » augmente elle aussi vers P_3 . Il est possible que les étudiants plus avancés aient simplement mal interprété la question, parce qu'il semble peu probable que des étudiants ayant une grande expérience pratique (au laboratoire) aient de plus en plus cette idée naïve. Il est possible qu'ils aient négligé de voir que le contenant de la question Q14 était un contenant fermé – pourtant les autres étudiants ayant répondu incorrectement à cette question n'étaient pas non plus à l'abri de cette interprétation erronée du schéma de la question. Il faudrait, pour confirmer cette observation surprenante, questionner plus directement les étudiants sur ce sujet.

La dernière difficulté conceptuelle qui augmente en fréquence au fur et à mesure des études, une conception alternative, est celle selon laquelle la polarité serait le facteur le plus important pour la prédiction de la solubilité. Ce résultat peut peut-être s'expliquer aussi par

l'augmentation de la fréquence du raisonnement par expérience de cas chez les étudiants qui avancent dans leurs études, en particulier en ce qui a trait à leur expérience de plus en plus complète du travail en laboratoire. Il arrive régulièrement que les étudiants doivent juger de la solubilité d'un composé dans l'autre en laboratoire, que ce soit lors d'identification de substances inconnues ou lors de l'utilisation de techniques d'isolation comme l'extraction liquide-liquide. Au fur et à mesure que les étudiants avancent dans leurs études, ils gagnent l'expérience des solvants qui sont insolubles dans l'eau, simplement à force de travailler avec eux régulièrement. Des étudiants de chimie organique peuvent contraindre leur raisonnement en se disant que le dichlorométhane n'est pas soluble dans l'eau parce qu'il n'est pas polaire, point à la ligne. En fait, le dichlorométhane est un peu soluble dans l'eau, parce qu'il est un peu polaire, mais il ne l'est pas beaucoup parce qu'il ne fait pas de ponts H avec l'eau, ce qui est le facteur le plus important à considérer. L'expérience des étudiants plus avancés les a probablement poussés à répondre intuitivement et sur la base d'une heuristique, plutôt que de construire un raisonnement complet, qui les aurait menés à une bonne réponse quant à la raison qui explique pourquoi l'acide formique est très soluble dans l'eau (qui était le sujet de la question Q06 à la base de l'identification de cette conception).

5.4.4 Sommaire de la phase principale de la recherche

Les résultats présentés dans cette section, obtenus auprès d'un grand nombre d'étudiants, pointe vers trois conclusions : les étudiants du niveau collégial sont nombreux à démontrer la présence dans leurs structures cognitives de conceptions alternatives, de fragmentations, quand ce n'est pas carrément des carences ou des difficultés d'ordre logique. Les difficultés conceptuelles observées d'abord lors de la phase pilote ont été en effet observées à nouveau dans la phase principale, qui a permis d'en quantifier la fréquence.

Au-delà du nombre de difficultés conceptuelles observées, on remarque aussi un profil d'extinction de ces difficultés assez variable à travers les études : certaines restent tout aussi fréquentes au fur et à mesure que des cours de chimie supplémentaires sont suivis et réussis, d'autres diminuent, et même un petit nombre va jusqu'à augmenter.

Ces observations, traçant un portrait pertinent et nécessaire de la situation conceptuelle en chimie au niveau collégial québécois, permettront de formuler quelques recommandations pour l'enseignement de la chimie, dont il sera question au chapitre suivant, et qui seront suivies par les réponses aux questions de recherche présentées au chapitre 3.

Rapport-Gratuit.com

6 Discussion

De nombreuses difficultés conceptuelles ont été observées dans les réponses des étudiants au questionnaire à deux paliers « Molécules, polarité et phénomènes ». Il est particulièrement troublant de constater que plusieurs d'entre elles sont très répandues dans la population étudiante de Sciences de la nature. Les enseignants de chimie seront certainement préoccupés de découvrir que des concepts, pourtant de base, ne semblent pas maîtrisés par leurs étudiants.

Les chercheurs s'entendent pour dire qu'une des causes de la présence de conceptions alternatives dans l'esprit des étudiants en chimie, surtout au niveau postsecondaire, vient de l'enseignement lui-même (Albanese & Vicentini, 1997; Bodner, 1991; Coll & Treagust, 2001; Hartley, Wilke et coll., 2011; Taber, 2011; Taber & Coll, 2002). Les auteurs des études qui le démontrent ne jettent pas le blâme sur les enseignants : ils indiquent plutôt que puisque c'est dans la classe de chimie que les étudiants construisent leurs modèles mentaux, parfois en désaccord avec la théorie scientifique, c'est là que se trouve la source de leurs conceptions alternatives. Selon la personnalité des étudiants, leurs capacités cognitives respectives et leur bagage de connaissances antérieures, la construction personnelle qu'ils feront des contenus qui leur sont présentés en classe de chimie pourra varier grandement d'un étudiant à l'autre et différer de façon importante de celle de l'enseignant. Les étudiants sont les premiers responsables de leur apprentissage, mais les enseignants peuvent les aider à construire des modèles mentaux adéquats des notions qu'ils étudient. Il faut aussi reconnaître que les étudiants qui arrivent au cégep en Sciences de la nature n'en sont pas à leurs premières armes en chimie; leurs conceptions alternatives tirent possiblement leur origine de l'enseignement reçu au secondaire.

Les résultats présentés ici distinguent les conceptions alternatives des autres difficultés conceptuelles que sont les obstacles de fragmentation (demi-raisonnement et simplification abusive), les obstacles de carence et les erreurs logiques. Toutes les difficultés conceptuelles peuvent mener à des prédictions ou des explications incorrectes en chimie, mais les conceptions alternatives sont des représentations inadéquates des concepts scientifiques, alors que les fragmentations ou les carences sont causées par un manque ou une désorganisation des

connaissances antérieures. Les erreurs logiques, quant à elles, sont l'agencement formellement incorrect d'idées reliées entre elles, transcendant le domaine propre de la chimie.

La première condition pour planifier un enseignement qui visera à changer les conceptions alternatives des étudiants est de connaître ces dernières. Afin de fournir aux enseignants une base sur laquelle s'appuyer pour tenter ce changement conceptuel, les conceptions alternatives les plus saillantes observées dans cette recherche seront reprises ici et certaines recommandations seront formulées, tirées notamment de recherches antérieures sur des populations semblables à celles du Québec.

6.1 La définition de la molécule : un problème criant

À propos des résultats de la présente recherche, il a été mentionné ailleurs (Cormier, 2013) que les étudiants de Sciences n'ont pas de définition opérationnelle de ce qu'est une molécule. Les résultats présentés ici vont dans ce sens. À la question Q20, les deux tiers des répondants (1301 étudiants) ne parvenaient pas à déterminer correctement lequel des schémas représentait des molécules (voir figure 20), et à la question Q02, c'était plus de 85 % des répondants (1692 étudiants) qui ne savaient pas que le NH_4Br n'existe pas sous forme de molécules.

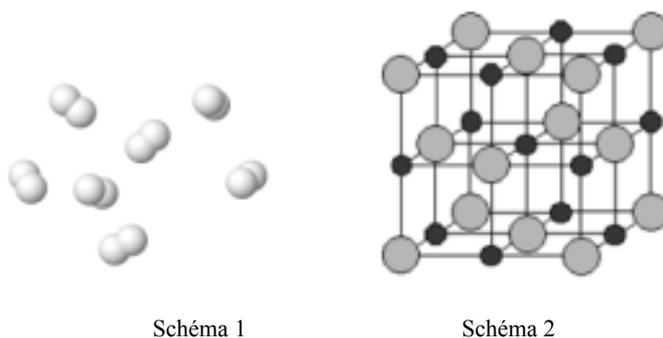


Figure 20 : Choix de réponse au premier palier de la question Q20

Il est possible que la majorité de ces étudiants se trompent parce qu'ils ont rarement été appelés à travailler avec des substances dont la structure sous-microscopique n'est pas organisée en molécules, comme les sels, les métaux ou les solides covalents. En effet, au laboratoire comme dans les manuels, le contenu collégial de chimie porte surtout sur les molécules. Dans le cours Chimie générale, on voit la nomenclature des composés ioniques et des composés

moléculaires distinctement, mais la réalité tangible derrière cette correspondance entre le nom et la formule chimique n'est pas souvent invoquée : le chapitre de nomenclature contient beaucoup de connaissances déclaratives que les étudiants doivent mémoriser, ce qui sollicite leurs ressources cognitives au maximum de leur capacité et donne peu de temps aux enseignants pour faire le pont entre la formule et la représentation du monde sous-microscopique.

Les étudiants qui ont répondu incorrectement à la question Q20 n'ont pas appris la définition du mot « molécule ». Une hypothèse concernant ce problème de définition du mot molécule, pourtant abondamment utilisé dans les cours de sciences depuis le niveau secondaire, est qu'elle leur a peut-être été enseignée incorrectement dès le départ. En effet, si on se fie aux manuels scolaires utilisés au secondaire ou même au texte du Programme de formation de l'école québécoise, on peut voir cette simplification présentée comme une notion à enseigner.

Par exemple, les manuels Synergie (Couture & Peyronnet, 2008, p. 52) et Option Science (Cyr, 2010, p. 9), utilisés dans les écoles secondaires du Québec et approuvés par le ministère, disent que des composés ioniques sont formés de molécules. Le manuel Chimie générale (Chang & Papillon, 2009), quant à lui de niveau collégial, laisse supposer que tout assemblage d'atomes forme une molécule (p. 336).

Dans le Programme de formation de l'école québécoise, on voit une simplification quant à l'organisation de la matière dans le domaine sous-microscopique dans la phrase suivante : « [...] la matière est constituée d'atomes qui se combinent selon leurs affinités et qui forment des molécules d'éléments ou de composés plus ou moins complexes » (MELS, 2008a, p. 37). Pire encore, un autre extrait du même texte laisse croire que la dissociation des ions est un processus qui peut être fait à partir de molécules : « La transformation physique qui s'opère lors de la mise en solution dans l'eau et la conductibilité électrique des solutions d'électrolytes s'expliquent par la dissociation des molécules d'électrolytes en ions » (MELS, 2008a, p. 59). Les molécules ne se dissocient pas en ions. Si c'est vrai que lorsque la conductibilité électrique augmente, on peut déduire qu'il y a présence d'ions dans l'eau, seulement certaines molécules s'ionisent en réalité (les acides, par exemple). Mais dans tous les cas, la dissociation ionique n'est le propre que des composés ioniques. La vaste majorité des composés moléculaires demeurent intacts en solution; c'était d'ailleurs le sujet du leurre c1 de l'item Q10 du MPP, à propos de la mise en solution de l'éthanol. La confusion entre « dissociation ionique » et

« ionisation des molécules » a d'ailleurs déjà rapportée dans les écrits de recherche (Butts & Smith, 1987).

S'il est vrai qu'il peut être difficile d'enseigner tous les contenus et leurs définitions complètes aux élèves du secondaire, il ne faudrait pas que cette difficulté de transposition didactique cache en réalité une ignorance des définitions complètes des enseignants et des décideurs de contenus. Les résultats de la phase pilote de la présente recherche, menée en partie avec des étudiants universitaires au baccalauréat en enseignement des sciences, montrent qu'il est possible que même les enseignants du secondaire ignorent la différence entre une molécule et un composé ionique : seule une étudiante sur six de ce groupe a identifié correctement les schémas de molécules dans une question semblable à l'item Q20 du MPP.

Si on ne peut pas s'attendre à ce que le cours secondaire enseigne l'alpha et l'oméga de la chimie, on devrait au moins pouvoir s'attendre à ce que les enseignants de sciences aient des connaissances de chimie qui dépassent le strict contenu à enseigner et qu'ils connaissent la distinction entre molécule et non molécule. Il pourrait aussi être souhaitable que le Programme de formation de l'école québécoise ne contienne pas d'erreurs quant à la définition de la molécule, car ces erreurs risquent d'être transposées dans les manuels et probablement aussi dans les classes.

Mais même si les enseignants présentent correctement les définitions de composé ionique et de molécule, les élèves peuvent aussi s'être construit une définition « simplifiée » du concept. Comme on l'a vu précédemment, des définitions partielles peuvent aussi mener à de mauvaises réponses. Si les étudiants savent, par exemple, qu'une molécule est composée d'éléments non métalliques, comment cette définition partielle peut-elle les aider à répondre à la question Q20, qui ne précise pas la nature des atomes? Cet exemple illustre pourquoi il est important qu'une définition soit complète.

Or, pour faciliter l'apprentissage de contenus pouvant être définis, il faut garder à l'esprit qu'il ne suffit pas de présenter une définition claire aux étudiants, étant donné les difficultés de raisonnement logique qu'éprouvent plusieurs d'entre eux (Piburn, 1990). Plutôt que d'énoncer une définition de la molécule, les enseignants devraient s'appliquer à faire l'analyse systématique du concept, en présentant des exemples et des contre-exemples et en déterminant les attributs essentiels et les attributs variables de chaque définition (Herron, 1996). Sur cette

base, il a été proposé, à l'Annexe A « Notion de chimie », une définition contrastée des concepts de molécule, de composé ionique, de métal, etc.

Mais la définition du concept de molécule n'est probablement pas le seul problème que posait la question Q20 aux étudiants. Ceux-ci, notamment, devaient comprendre la signification des schémas avant de pouvoir utiliser la définition de la molécule. Or, certains étudiants ne comprennent pas les différentes façons de représenter schématiquement la nature sous-microscopique de la matière (Cheng & Gilbert, 2009). Avant de pouvoir répondre à la question Q20, les étudiants doivent opérer le lien entre les domaines du savoir (sous-microscopique, macroscopique et symbolique, comme expliqué dans le chapitre 2, « Cadre conceptuel »). Cette correspondance peut paraître évidente aux enseignants, mais Gilbert et Treagust (2009) ont démontré que les étudiants ont de la difficulté à se représenter simultanément le contenu de chimie aux trois domaines du savoir.

S'il est difficile pour les étudiants de comprendre des représentations graphiques ou schématiques, c'est aussi parce qu'on leur demande rarement de modéliser un phénomène en employant des schémas (Davidovitz & Chittleborough, 2009). Les questions de stœchiométrie, dans lesquelles les étudiants doivent souvent prédire la masse d'un produit après réaction, leur demandent (explicitement ou implicitement) d'équilibrer les coefficients, de déterminer le réactif limitant et de calculer la quantité du produit (puis sa masse). Or, les étudiants réussissent moins bien ce genre de question si l'énoncé présente une situation schématique du mélange réactionnel, plutôt qu'une équation réactionnelle (Yarroch, 1985). En effet, si on leur présente une équation, les étudiants peuvent réussir le problème sans passer d'un domaine du savoir à l'autre : ils procèdent seulement au domaine symbolique. Quand la situation est plutôt représentée de façon schématique, les étudiants doivent opérer la transition entre le domaine sous-microscopique et le domaine symbolique. Des exercices en ce sens seraient plus difficiles pour eux, mais favoriseraient leur apprentissage de la chimie.

À la question Q02, à laquelle il fallait dire si H_2SO_4 et NH_4Br existent sous forme de molécule, le manque de familiarité des étudiants avec les ammoniums (composés ioniques contenant l'ion ammonium, NH_4^+) explique probablement une partie des résultats. Si on avait plutôt demandé de trancher entre H_2SO_4 et un sel plus familier, comme NaCl , la distribution aurait probablement été différente; il aurait pu être alors plus certain que ceux qui choisissent le

sel croient que tout assemblage d'atomes constitue une molécule. Toutefois, la question a été construite de façon à présenter un sel moins familier aux étudiants : en effet, cet item voulait vérifier quel raisonnement employaient les étudiants pour juger de la nature d'un composé (s'ils invoquaient la définition complète de la molécule). Si le NaCl avait fait partie de la question, les étudiants auraient pu simplement se souvenir que ce composé est un sel, étant donné leur très grande familiarité avec ce composé. C'est pour éviter cette possibilité de recourir à l'heuristique de la reconnaissance que le NH_4Br a été proposé dans cet item.

Cette question montre malgré tout que les étudiants ne savent pas que les sels d'ammonium sont des composés ioniques. Comme ces composés servent souvent d'exemples dans le cours Chimie des solutions, plus précisément dans le chapitre sur le pH des solutions de sels non neutres, il pourrait être pertinent de faire un retour en classe sur leur organisation sous-microscopique. La confusion semble régner chez la plupart des étudiants au sujet de la différence entre la dissociation ionique des sels et l'ionisation des composés moléculaires (Butts & Smith, 1987), phénomènes d'autant plus compliqués lorsqu'on parle d'électrolytes faibles (sels peu solubles, acides et bases faibles). C'est possiblement cette confusion qui se manifestait dans la présente étude quand les étudiants pensaient que l'éthanol s'ionise en solution dans l'eau (323 étudiants, Q10) ou que la principale raison expliquant la solubilité d'un acide faible est qu'il forme des ions (1050 étudiants, Q06).

Pour aider les étudiants à se construire une représentation plus adéquate des solutions aqueuses, qu'elles contiennent un soluté moléculaire ou ionique, Butts et Smith (1987) recommandent de procéder, avec un support schématique juste, à une comparaison systématique du processus de mise en solution dans l'eau d'un composé moléculaire (comme le sucre) et d'un composé ionique (comme le sel de table), en explicitant la nature et le comportement physique des particules de la solution (y compris le rôle et le comportement des molécules d'eau). On pourrait ajouter à cette recommandation de compliquer les choses en représentant – ou en demandant aux étudiants de représenter – les situations plus complexes de la mise en solution d'acides forts, d'acides et de bases faibles, de bases fortes (qui se dissocient comme des sels) et de sels peu solubles. Si on vise à ce que les étudiants comprennent la différence entre « molécules » et « non-molécules », on doit leur fournir un panorama complet et explicite de toutes les situations possibles.

6.2 Les atomes ont les propriétés des substances, les éléments ont celles de leurs composés

Les questions Q01 (« Atome de soufre ») et Q08 (« Halogène solide ») ont toutes deux permis de détecter qu'un pourcentage alarmant d'étudiants avaient une conception alternative du type de l'explication corpusculaire tautologique (CA-ECT). Pour la question Q01, les étudiants croyaient en grand nombre (940 répondants) que les atomes de soufre, tout comme la substance qu'ils constituent, sont cristallins, friables et jaunes, et qu'ils fondent à 113 °C. Une autre portion assez élevée de l'échantillon (368 étudiants) adhérait à l'idée que l'atome de soufre est cristallin et friable, et qu'il fond à 113 °C, mais pas à celle voulant qu'il soit jaune. Il semble que des étudiants universitaires également aient manifesté une telle croyance en la transposition des propriétés macroscopiques aux atomes (Mulford & Robinson, 2002), dans une proportion de 75 %, pour un item très semblable. Selon Garnett, Garnett et Hackling (1995), cette conception alternative serait associée à un obstacle épistémologique; ils l'attribuent à une incapacité des étudiants à visualiser correctement les particules qui constituent la matière. Taber (2001a) l'attribue quant à lui au modèle corpusculaire tautologique (dont est tiré le nom de la catégorie de conception alternative « ECT »), dans lequel les étudiants transfèrent aux atomes les propriétés de la matière macroscopique. Le fait que rarement dans le cours normal de l'enseignement les étudiants soient appelés à représenter une situation du domaine sous-microscopique peut certainement expliquer cette tendance fort répandue. Plusieurs étudiants répondant à ce test ne s'étaient probablement jamais demandé de quoi a l'air un atome de soufre. Cette conception alternative n'est probablement pas fortement ancrée dans les structures cognitives des étudiants; ceux-ci l'ont sans doute construite sur le coup, à la lumière des choix de réponse proposés. Comme il est difficile pour les étudiants de s'imaginer des atomes, García Franco et Taber (2009) recommandent de les encourager à développer une certaine familiarité avec la nature corpusculaire de la matière, au-delà de la connaissance déclarative désincarnée selon laquelle « toute matière est constituée d'atomes », de façon à ce qu'ils intériorisent les modèles sous-microscopiques et qu'ils puissent les invoquer dans leurs explications.

À la question Q08, qui demandait quel halogène est un solide à température de la pièce, près de la moitié des étudiants ont choisi le chlore (902 répondants). Cette réponse en particulier

montre que les étudiants utilisent un raisonnement en raccourci pour répondre à des questions comme celles du test « Molécules, polarité et phénomènes ». En effet, tous les répondants avaient reçu un enseignement formel sur l'état de la matière et les liaisons intermoléculaires, puisqu'ils avaient tous suivi le cours Chimie générale avant de répondre au test. Le fait que près de la moitié d'entre eux ait répondu le contraire de ce qu'on leur a enseigné en faisant référence, dans les justifications, à des raisons tirées du quotidien (le chlorure de sodium est solide, le chlore dans les piscines est solide) montre qu'ils font appel à des conceptions profondément ancrées. Même dans un contexte où ils sont tout à fait conscients de devoir répondre à des questions de chimie (durant un cours de chimie!), ils font plutôt appel à des représentations spontanées. On obtient le même genre de réponse lorsqu'on demande à des étudiants de décrire l'apparence du calcium. Theodore Gray, dans son livre sur les éléments, décrit bien la façon dont les gens se représentent le calcium : « Quand on dit "calcium", la plupart des gens pensent à des choses blanches et crayeuses, ou peut-être au lait » (Gray, 2010, p. 55). Une certaine expérience d'enseignement de cette question avec les étudiants peut indiquer que plusieurs d'entre eux, sinon la majorité, décrivent en effet spontanément le calcium comme un solide blanc, crayeux, poudreux, etc., plutôt que comme un métal argenté et mou (sa véritable apparence).

Il ne faut pas non plus négliger le fait que les liaisons covalentes sont enseignées plus en détails que les liaisons intermoléculaires, dans les cours de chimie. Le fait de recourir aux liaisons intermoléculaires pour expliquer un phénomène, ou simplement de les distinguer des autres types de liaisons chimiques, est peut-être difficile pour les étudiants, qui n'ont pas pris l'habitude de les invoquer spontanément. Ce manque de familiarité avec les liaisons intermoléculaires explique probablement une partie du cadre conceptuel des liaisons chimiques, nommé ici le « grand sac » des liaisons chimiques. En effet, il peut être plus habituel de raisonner selon la dualité liaisons covalentes/liaisons ioniques pour les étudiants collégiaux, parce que c'est d'abord de cette façon que les liaisons chimiques leur est présentée, au secondaire.

Taber (2001a) recommande aux enseignants de chimie de ne pas oublier que tous les modèles qu'on enseigne aux étudiants reposent sur des observations expérimentales. Ainsi, les explications que les enseignants construisent pour leurs étudiants devraient invoquer la matière selon la représentation externe correspondant au domaine macroscopique : en faisant

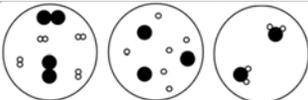
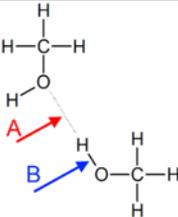
inlassablement le parallèle entre ce qui se voit et ce qui est modélisé, les enseignants pourraient amener les étudiants à systématiquement se référer à la relation entre les domaines du savoir pour leurs explications. De plus, les enseignants gagneraient à faire remarquer à leurs étudiants les propriétés macroscopiques des éléments comme le chlore ou le calcium, en soulignant qu'elles diffèrent de celles de leurs composés, comme le « chlore à piscine », de l'hypochlorite de calcium, par ailleurs composé de chlore, de calcium et d'oxygène. Lors de la discussion sur l'hypochlorite de calcium, un enseignant pourrait saisir l'occasion de revenir sur la distinction molécule/non-molécule, l'hypochlorite de calcium étant une « non-molécule » (c'est un composé ionique), et même aller plus loin en amenant les étudiants à réfléchir sur la distinction entre un composé ionique solide et une solution aqueuse de ce composé. La présente recherche ne s'est pas penchée sur ce dernier sujet, qui toutefois s'avérerait probablement un terrain fertile en conceptions alternatives.

6.3 Trois items caractéristiques pour les étudiants ayant le plus de difficulté

Les résultats aux différentes questions ont été analysés pour trouver des patrons de réponse cohérents. Comme mentionné précédemment, peu de cohérence entre les conceptions a été observée. Toutefois, trois items ont montré une cohérence entre eux. Voici l'analyse qui a mené à identifier ces trois items caractéristiques, ou items d'ancrage.

Question par question, les étudiants ayant choisi la mauvaise réponse au premier palier ont été regroupés. Pour chaque question, le score pondéré par item de ces étudiants a été comparé au score pondéré de tous les autres étudiants. Généralement, le fait de mal répondre à une question ne permettait pas de prédire une grande partie des résultats à une autre question, sauf pour trois items : les items Q05, Q15 et Q17, dont le tableau XXVII présente un résumé.

Tableau XXX : Résumé des items Q05, Q15 et Q17, les items d’ancrage pour les étudiants ayant le moins bien performé

Item	Choix de réponse, 1 ^{er} palier	Mauvaises réponses	Nombre d’étudiants
Q05 – La plus polaire, boules et bâtonnets		a et c	685
Q15 – Vue grossie après évaporation		a et b	673
Q17 – Où est la liaison hydrogène		b et c	778

Pour chacun de ces trois items, le fait de répondre incorrectement au premier palier est associé à un score significativement plus bas que la moyenne dans 16 à 18 autres items ($p < 0,05$). Il est intéressant de voir que ces questions sont parmi les plus basiques de tout le test, mais que plusieurs étudiants ont quand même une mauvaise réponse au premier palier. On pourrait considérer ces trois items comme des items d’ancrage : lorsque les étudiants réussissent mal ces trois items, on peut alors poser diagnostic sévère, mais exact, sur leur niveau de compréhension, qui est très faible en général sur les concepts de molécule, polarité, liaisons et phénomènes macroscopiques.

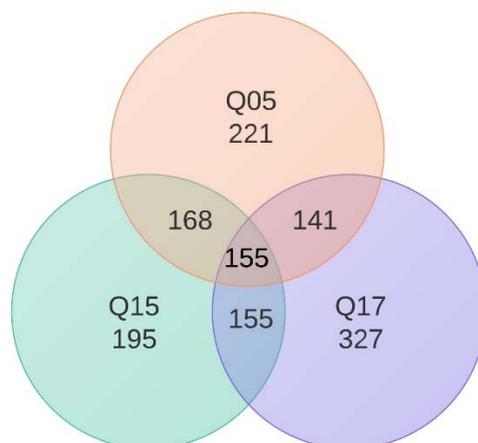


Figure 21 : Diagramme de Venn représentant la distribution des étudiants ayant incorrectement répondu aux items Q05, Q15 et Q17

Plus du tiers des étudiants répondent incorrectement à chacun de ces trois items (673 étudiants, 685 étudiants et 778 étudiants). Près de 8 % de l'échantillon complet répond incorrectement aux trois items.

Le problème principal pour chacun de ces trois items sera discuté dans les sections suivantes.

6.3.1 Polarité des molécules : la base pose encore problème

Lorsqu'on sait que pour déterminer la polarité d'une molécule, on doit considérer l'électronégativité des atomes, celle-ci indiquant la polarité des liaisons, puis déterminer la géométrie autour de chaque atome central et enfin additionner mentalement les vecteurs de moment dipolaire de chaque liaison, on peut comprendre que des questions comme Q07 (« La plus polaire, Lewis ») ait connu un succès assez mitigé. En effet, au premier palier, seuls 17 % des étudiants ont bien répondu à cette question. Mais lorsque la tâche est extrêmement simplifiée, comme à la question Q05, où il suffit d'additionner les vecteurs, comment expliquer que le tiers des étudiants ne choisit-il toujours pas la bonne réponse? Il semble que pour ces étudiants, la difficulté est causée par une erreur de raisonnement de type « argument opposé » (chez 12,4 % des étudiants) ou par une mauvaise maîtrise de la technique de l'addition vectorielle elle-même (18,3 % des étudiants). Sachant que tous les répondants ont suivi le cours

Chimie générale, il est préoccupant de voir que la détermination de la polarité des molécules, même lorsqu'on donne tous les indices, demeure une tâche difficile pour les étudiants.

Les conclusions de la présente recherche se rapprochent de celles de Furió et ses collaboratrices (2000), qui ont étudié la façon dont les étudiants raisonnent lorsqu'on leur demande de prédire la polarité de molécules. Selon eux, les étudiants ont souvent tendance à appliquer un raisonnement de sens commun, à se fier aux caractéristiques explicites de l'énoncé et à ne pas appliquer systématiquement un raisonnement analytique. Ils appellent cette façon de procéder en raccourci la réduction fonctionnelle, dont il a été question dans le chapitre 2, « Cadre conceptuel ». Pour éviter que les étudiants aient recours à celle-ci lorsque vient le temps de prédire la polarité des molécules, Furió et ses collaboratrices recommandent que les enseignants demandent aux étudiants de mettre en lumière tous les paramètres à considérer pour une telle prédiction, dans une activité dont ils proposent qu'elle se déroule en équipes. Ainsi, les étudiants prendraient conscience des nombreux paramètres à considérer pour faire ce genre de prédiction; ils seraient ainsi moins portés, par la suite, à suivre un processus en raccourci pour résoudre ce genre de problème.

6.3.2 Évaporation de l'eau : ne donne pas de l'eau pour plusieurs étudiants

À la question Q15 (« Vue grossie après évaporation »), plus du tiers des étudiants ont choisi l'oxygène et l'hydrogène (moléculaire ou atomique) comme produits de l'évaporation de l'eau. Cette conception alternative (classée CA-PcomC, c'est-à-dire « physique vu comme chimique ») était attendue, soit « l'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules », car d'autres études ont posé cette question, et plus particulièrement à des étudiants de l'âge des étudiants de cégep : Mulford et Robinson (2002) ont en effet observé que 29 % des étudiants universitaires choisissent les options où les atomes d'oxygène et d'hydrogène des molécules d'eau forment d'autres espèces après évaporation. Mais cette conception alternative ne manquera sûrement pas de surprendre les enseignants, puisque les cours Chimie générale et Chimie des solutions traitent des changements de phase, souvent revus en Chimie organique.

Le fait que plusieurs étudiants croient que les liaisons covalentes se brisent lors de l'évaporation, comme l'a confirmé la question Q14 (« Température d'ébullition,

éthanol/méthanol »), est préoccupant pour la compréhension des concepts reliés comme les diagrammes de phase, la loi de Raoult ou la distillation.

Pour un chimiste, l'**évaporation** est le changement entre la phase liquide et la phase gazeuse, et la **température d'ébullition** est la celle à laquelle la pression de vapeur d'un liquide est égale à la pression ambiante. Ces deux concepts parlent de la transition liquide/gaz, et les produits sont les mêmes, dans les deux cas : la substance qui était liquide devient gazeuse, mais ses molécules restent intactes – sinon, ce ne serait pas la même substance.

Pour les étudiants, par contre, il semble que température d'ébullition ne rime pas toujours avec évaporation. En effet, plus d'étudiants croyaient que les liaisons covalentes seraient brisées lors de l'**ébullition** de l'éthanol, à la question Q14 (1221 répondants) que d'autres croyaient que l'eau serait transformée en oxygène et en hydrogène après **évaporation**, à la question Q15 (673 répondants). Peut-être que des facteurs autres que la compréhension de ces deux concepts expliquent cette différence : d'abord, à la question Q14, les composés (éthanol, méthanol) étaient moins familiers aux étudiants; par ailleurs, la question Q15 simplifiait le problème en ne demandant de raisonner qu'à un seul domaine du savoir (le domaine symbolique), alors que pour répondre à Q14, il fallait de plus invoquer le domaine sous-microscopique, qui n'était qu'implicite dans l'énoncé.

Quoi qu'il en soit, cette différence entre ébullition et évaporation fait penser à certaines difficultés qui ont été notées dans l'enseignement dans un cégep, le cégep André-Laurendeau, et que reconnaîtront peut-être les autres enseignants de chimie. Dans le cours de deuxième année au cégep André-Laurendeau, Chimie organique, les étudiants doivent faire l'analyse de composés inconnus lors d'un examen de laboratoire. Une semaine avant l'examen, on leur remet la liste des inconnus possibles et ils doivent chercher dans la documentation (le *Merck Index*, le *Handbook of Chemistry and Physics*) les valeurs de points de fusion et d'ébullition, les valeurs de solubilité, enfin tout ce dont ils auront besoin le jour de l'examen pour identifier leurs inconnus. On leur recommande de classer la liste d'inconnus possibles en deux catégories : les liquides et les solides. Ainsi, dès qu'ils recevront leur composé, ils pourront éliminer une partie des possibilités en notant simplement si c'est un liquide ou un solide. Les étudiants utilisent les banques de données chimiques et notent, pour chaque composé si c'est un « liquide jaune », un « solide cristallin blanc », etc. Mais on ne décrit pas toujours les composés de cette façon,

notamment dans le *Handbook*, où l'on donne seulement les points de fusion et d'ébullition des composés organiques. Avec cette information, plusieurs étudiants ne savent pas trancher si leur composé est un liquide ou un solide à température de la pièce. Le benzaldéhyde, par exemple, a un point de fusion de $-57,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un point d'ébullition de $178,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (HCP, 2013). Lorsqu'ils voient ces deux valeurs, ces étudiants sont incertains : si le composé peut à la fois passer de solide à liquide (fusion) et de liquide à gazeux (ébullition), alors comment savoir quel sera son état le jour de l'examen?

Bien entendu, un chimiste classe facilement le benzaldéhyde dans la catégorie des liquides : il ne sera solide que sous $-57,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ et gazeux, qu'à une température supérieure à $178,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. À la température de la pièce, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, on est entre les deux, le benzaldéhyde est liquide.

Cette difficulté à comprendre la réalité tangible des valeurs de changement de phase est probablement reliée à celles qu'ont rencontrées les étudiants aux questions Q14 et Q15.

Pour favoriser l'apprentissage de ces notions, les enseignants doivent encore ici délibérément stimuler en classe la transition entre les domaines du savoir. Des problèmes où l'on demande de classer les composés en ordre de température d'ébullition ou de fusion ne peuvent pas être suffisants, parce qu'ils ne sollicitent qu'un seul domaine de représentation (le domaine symbolique) et peuvent induire la conception alternative selon laquelle les liaisons covalentes se brisent lors du changement de phase – en tout cas, ils ne la démontent pas. Souvent, cette tâche de classement devient pour les étudiants l'application d'une procédure. Les plus performants évaluent correctement l'importance relative des liaisons intermoléculaires et parviennent à classer les composés. Mais il semble, à la lumière des résultats de la présente étude, qu'il y ait une marge entre la prédiction de propriétés et la compréhension du phénomène, et même les étudiants qui parviennent à appliquer la procédure ont pour plusieurs une représentation inadéquate de ce qui se déroule durant l'évaporation. Pour les enseignants, l'ébullition et l'évaporation sont deux aspects du même phénomène, mais les étudiants peuvent ne pas comprendre.

De façon similaire à ce qui est demandé en préparation à l'examen de laboratoire, il pourrait être pertinent de proposer des questions très simples aux étudiants : si le cholestérol a une température de fusion de $148,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, quel est son état à température de la pièce (réponse : c'est un solide)?

Barker et Millar (2000) recommandent quant à elles que les enseignants consacrent du temps en classe à étudier les tendances d'évolution du point d'ébullition de différents composés pour tenter de faire comprendre aux étudiants la relation entre ces mesures macroscopiques et la structure sous-microscopique des composés.

De plus, et pour faire suite à ce qui était proposé précédemment, demander aux étudiants d'interpréter ou de tracer des représentations sous-microscopiques de la matière aux changements de phase (comme dans l'énoncé des questions Q15 et Q18) pourrait favoriser le développement de conceptions scientifiques dans leur esprit.

Dans cette perspective de traiter les conceptions alternatives par des questions conceptuelles à discuter avec les étudiants, des capsules de changement conceptuel nommées « Au-delà des conceptions » ont été intégrées dans un manuel de Chimie organique pour le niveau collégial (Voisard & Cormier, 2013). Sur la base des conceptions alternatives relevées durant cette recherche, et avec l'apport des écrits scientifiques, ces capsules proposent de faire réfléchir les étudiants collégiaux sur les conceptions alternatives que plusieurs d'entre eux ont. Ces capsules pourraient aussi être utilisées par les enseignants pour favoriser le changement conceptuel de leurs étudiants.

6.3.3 Où est la liaison hydrogène? Partout!

La simplification abusive observée chez plus du tiers des étudiants à la question Q17, soit que la liaison hydrogène peut être une liaison covalente, s'inscrit dans la suite de la conception alternative observée à la question Q15, concernant le bris des liaisons covalentes lors de l'évaporation. Un étudiant qui a ces deux difficultés conceptuelles pourrait tenir le raisonnement suivant : les liaisons hydrogène sont aussi des liaisons covalentes, les liaisons hydrogène se brisent lors du changement de phase, donc toutes les liaisons covalentes se brisent lors du changement de phase.

L'incapacité de distinguer, sur un schéma, quelles liaisons sont des liaisons hydrogène et lesquelles n'en sont pas relève du cadre alternatif de la liaison chimique mentionné plus tôt, c'est-à-dire que les étudiants confondent tous les types de liaisons. Ce cadre alternatif peut également expliquer leur difficulté à faire la distinction entre les molécules et les sels; en ce

sens, il démontre de la cohérence parmi les différentes réponses des étudiants qui semblent y adhérer.

À la question Q17, portant sur les liaisons hydrogènes et dont l'énoncé présente lui aussi un schéma, la difficulté qu'ont les étudiants d'interpréter les notions au domaine sous-microscopique du savoir a encore été observée. Les mêmes recommandations s'appliquent donc : pour améliorer la façon dont les étudiants se représentent mentalement les liaisons intermoléculaires, il peut s'avérer fructueux de leur faire exprimer cette représentation sur papier et d'en donner une rétroaction formative. Bien entendu, une leçon portant précisément sur la distinction entre liaison intramoléculaire et liaison intermoléculaire pourra être pertinente, peut-être en aval de l'enseignement des différents types de liaisons, pour mettre en évidence leurs ressemblances et leurs différences.

En général, les étudiants confondent les liaisons intermoléculaires et les liaisons intramoléculaires, comme il a été observé chez 979 répondants (à la question Q11). Peterson et Treagust (1989) ont également détecté cette simplification abusive chez 23 % d'un échantillon d'étudiants australiens de douzième année (équivalent de la première année de cégep). Si ce n'est qu'une question de vocabulaire (les étudiants tendent à confondre « intramoléculaire » et « intermoléculaire », parce que les deux mots se ressemblent), l'intervention pédagogique à prévoir est simple : il faut aider les étudiants à distinguer les mots. Mais à la lumière des autres questions du test « Molécules, polarité et phénomènes », il est possible d'avancer que le cadre alternatif de la liaison chimique ne relève pas uniquement d'un problème de vocabulaire.

L'ordre dans lequel on présente les contenus constitue probablement un obstacle didactique : habituellement, dans le cours Chimie générale, on étudie d'abord les théories de la liaison chimique, puis, quelques chapitres plus loin, les liaisons intermoléculaires. Ainsi, les étudiants ont bien compris la liaison covalente lorsqu'ils arrivent aux liaisons intermoléculaires, mais on enseigne celles-ci sans les mettre suffisamment en contraste avec les liaisons covalentes, qui constituent pourtant la base des connaissances antérieures sur laquelle l'enseignement devrait s'appuyer.

Bruner (1960) proposait qu'on enseigne les concepts dans un processus en spirale, où chaque notion est revue plusieurs fois, chaque fois en y ajoutant une nuance, un degré de complexité supplémentaire. L'occasion est belle, dans le cours Chimie générale, de mettre à

profit cette façon de construire les leçons : en arrivant à l'enseignement des liaisons intermoléculaires, il pourrait être judicieux de revenir sur ce que les étudiants savent des liaisons covalentes, puis de faire l'analyse didactique systématique des liaisons intermoléculaires en mettant bien en évidence les ressemblances et les différences entre les deux. En procédant ainsi pour l'enseignement de ces deux types de liaisons, on consoliderait les connaissances des étudiants sur l'une et on paverait la voie à l'apprentissage de l'autre.

Taber et Coll (2002) proposent aussi quelques recommandations pour l'enseignement des concepts autour de la liaison chimique. D'abord, les explications devraient être construites en se basant sur les principes physiques, en évitant de donner trop d'importance à des analogies anthropomorphiques. Ensuite, on devrait mettre l'accent sur les molécules et les ions, plutôt que sur les atomes. De plus, on devrait enseigner la liaison chimique comme un concept électrique, pour fournir une base au raisonnement des étudiants : toutes les liaisons étant causées par des attractions électrostatiques, il est possible d'expliquer, par exemple, que la longueur de liaison est inversement proportionnelle à son intensité, comme lors de toute attraction entre des charges opposées (ce qui constitue la loi de Coulomb). Aussi, on devrait insister sur la nature non moléculaire des réseaux non moléculaires. Enfin, les enseignants devraient toujours faire attention à la terminologie qu'ils utilisent afin d'éviter les équivoques et les incompréhensions.

6.4 Habiletés de raisonnement : apprendre à expliquer

Une des observations les plus frappantes de cette recherche, en particulier lors de la phase pilote où les étudiants devaient formuler eux-mêmes des explications quant à leurs réponses, est que même lorsqu'ils savent reconnaître les phénomènes reliés à la matière (évaporation, solubilité, polarité), les étudiants ne savent pas les expliquer et proposent de pseudo-explications tautologiques (par exemple, l'eau s'évapore parce qu'elle s'évapore toujours). C'est ainsi parce que leur raisonnement n'invoque pas les particules constituant la matière, ce qui permettrait d'expliquer les phénomènes relevant du domaine macroscopique. Effectivement, les notions reliées à la nature corpusculaire et la liaison chimiques permettent de déterminer la géométrie moléculaire, qui à son tour, grâce à la polarité des molécules et aux liaisons intermoléculaires que celles-ci peuvent former, rend possible l'explication des phénomènes macroscopiques.

Harrison et Treagust (2000) recommandent aux enseignants de ne pas se contenter d'exposer les concepts qu'ils enseignent, mais aussi de les expliquer. Il est particulièrement important que les étudiants entendent et comprennent de bonnes explications pour qu'ils puissent développer l'habileté d'en formuler eux-mêmes et de juger de la validité des explications des autres. Dans un processus d'apprentissage, les étudiants qui apprennent à juger de la validité et de la complétude d'explications pourront aussi développer leurs habiletés métacognitives et réfléchir sur l'exactitude logique d'un raisonnement.

Si l'on ne demande jamais aux étudiants d'expliquer des phénomènes en se basant sur les modèles de la chimie, ils auront peut-être la bonne réponse à des questions algorithmiques, mais risqueront d'être aux prises avec des conceptions alternatives latentes, qui se manifesteront plus tard au courant de leurs études et leur poseront alors des difficultés pour l'apprentissage de notions plus avancées. La conception alternative selon laquelle les molécules des composés moléculaires, quels qu'ils soient, s'ionisent au contact de l'eau en passant en solution (classée comme CA-PcomC) pourrait par exemple conduire à ce type de difficulté. Même si cette conception alternative n'a pas à proprement parler d'impact sur le calcul stœchiométrique, elle en aura sûrement un lors de l'apprentissage des propriétés colligatives (où les étudiants pourraient tenter d'appliquer un « coefficient de van 't Hoff » à n'importe quel composé moléculaire en solution) ou de la substitution nucléophile (où les étudiants verraient le groupement $-OH$ d'un alcool comme un bon groupe partant, puisqu'il « s'ioniserait » spontanément).

Comme il a été observé lors de la présente recherche et mentionné précédemment, Schmidt (1996) a remarqué, dans une étude avec des étudiants allemands de la fin du secondaire, que plusieurs étudiants détenaient la conception alternative selon laquelle les liaisons à l'intérieur des molécules étaient brisées lors du changement de phase. Toutefois, les questions d'examen de chimie qui s'adressaient à ces étudiants ne mettaient pas en lumière cette conception, puisque la posséder ne menait pas systématiquement à une mauvaise réponse. Les enseignants de chimie partageront toutefois certainement l'avis de Schmidt : cette conception alternative est grave, et un apprentissage adéquat de la chimie ne devrait pas la laisser s'installer dans les structures cognitives des étudiants, même s'ils peuvent malgré tout avoir de bonnes réponses aux examens.

6.5 Une difficulté propre au programme

Il ne faut pas négliger non plus, pour expliquer les difficultés des étudiants en chimie, de considérer les cours eux-mêmes, leur structure et les contenus qui y sont prescrits. En étudiant les énoncés de compétence publiés par le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Science (MESRS, autrefois MELS, 1998), qui énumèrent les contenus obligatoires pour chacun des cours de Sciences de la nature, on s'aperçoit que ces contenus sont nombreux, dans tous les cours. Une réflexion sur la structure même du programme de Sciences de la nature, en particulier à la lumière de la présente recherche qui trace un portrait révélateur mais peu reluisant de l'état des connaissances des étudiants, même finissants, de ce programme, pourrait s'avérer nécessaire.

Au moment de publier cette thèse doctorale, le MESRS s'apprête à élaborer une refonte du programme de Sciences de la nature pour la première fois depuis seize ans. Une telle refonte devrait, d'après l'interprétation des résultats présentés ici, considérer l'enseignement de concepts plus en profondeur, en ne négligeant pas de laisser de la place pour revoir plusieurs fois les mêmes concepts dans différents contextes (voire dans différents cours) pour assurer une compréhension conceptuelle sans ambiguïté aux étudiants. Les travaux sur le curriculum en spirale de Bruner (1960) ou encore la récente vague des progressions d'apprentissage aux États-Unis, servant à développer des programmes de sciences cohérents avec les difficultés conceptuelles reconnues dans les écrits de recherche (voir, par exemple, Plummer et coll., 2011), pourraient aider à construire un nouveau programme de Sciences de la nature plus en adéquation avec les difficultés manifestes des étudiants qui suivent en ce moment le programme actuel.

6.6 Retour sur les questions de recherche

La présente recherche a permis de répondre aux cinq questions de recherche. Voici un retour sur chacune d'elles.

1. *Quelles sont les conceptions alternatives les plus fréquentes en chimie autour des concepts de la molécule, de la liaison chimique, de la polarité et des phénomènes macroscopiques chez les étudiants du programme de Sciences de la nature?*

Les conceptions alternatives les plus fréquentes chez les étudiants de Sciences de la nature sont « les atomes ont des propriétés macroscopiques pareilles à celles de l'élément qu'ils constituent », « l'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules », « la solubilité dans l'eau est surtout attribuable à l'ionisation » et « les éléments ont les mêmes propriétés que les composés qu'ils forment ». Ces quatre conceptions alternatives ont été observées chez plus de 50 % des étudiants ayant répondu au MPP, soit plus de 992 étudiants.

D'autres difficultés conceptuelles ont aussi été relevées chez les étudiants de cette population. En particulier, la simplification abusive « tout regroupement d'atomes est une molécule », vue chez plus de 75 % des étudiants, et le demi-raisonnement « la forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les doublets libres » (chez plus de 25 % des étudiants).

Des carences dans les connaissances antérieures des étudiants ont aussi été observées. Parmi les plus fréquentes, on trouve la méconnaissance d'éléments communs et l'idée que la matière qui s'évapore disparaît complètement (à plus de 20 %).

2. *Quelles sont les différences, s'il en existe, entre la nature et la fréquence des conceptions alternatives en chimie des étudiants qui commencent leurs cours de chimie et les finissants du programme de sciences?*

Les conceptions alternatives, mais aussi les autres difficultés conceptuelles, peuvent se classer dans trois catégories au regard de leur fréquence au fur et à mesure que les étudiants suivent de plus en plus de cours de chimie : (1) les difficultés conceptuelles sont aussi fréquentes chez les étudiants qui commencent leurs cours de chimie et les finissants du programme de sciences de la nature (pour vingt-six de ces difficultés); (2) les difficultés conceptuelles diminuent au fil des cours suivis (pour quinze de ces difficultés); et (3) quelques difficultés conceptuelles augmentent au fil des cours suivis (pour six de ces difficultés). La nature des difficultés conceptuelles, le sujet sur lequel elles portent et l'expérience que développent les étudiants en chimie au fil de leur programme de Sciences de la nature permettent de proposer des interprétations relatives à ces observations.

3. *Quelles prédictions incorrectes ou explications incorrectes sont-elles attribuables à des conceptions alternatives, et lesquelles sont-elles plutôt attribuables à d'autres schémas menant des modèles mentaux aux réponses?*

Au total, soixante-douze difficultés conceptuelles ont été observées durant la présente recherche. Les quarante-sept principales, soit celles qui ont été observées chez plus de 10 % des répondants au MPP, sont présentées à l'Annexe F. Parmi le total de toutes les difficultés conceptuelles observées, seulement vingt d'entre elles sont véritablement des conceptions alternatives, soit des représentations personnelles qui sont en désaccord avec la théorie scientifique. Ainsi, plusieurs des difficultés conceptuelles à répondre au MPP se classaient plutôt dans d'autres catégories, c'est-à-dire celles présentées dans les schémas *modèles mentaux* → *réponse* proposés à la section 2.5. On parle alors de fragmentation et de carence (Schéma C) et d'agencement incorrect (Schéma D).

Il a semblé pertinent de distinguer les conceptions alternatives réelles (Schéma B) des obstacles de fragmentation et de carence, car même si elles peuvent mener toutes deux à des réponses ou des prédictions incorrectes, la façon de remédier aux unes et aux autres est probablement différente. Les conceptions alternatives gagneraient à être considérées par les enseignants comme des problèmes d'apprentissage nécessitant le développement de dispositifs didactiques visant le changement conceptuel. Les fragmentations des connaissances, par contre, peuvent être moins lourdes à traiter en classe, comme le suggérait Taber (2001b). Une partie des connaissances, exactes, sont déjà présentes dans l'esprit des étudiants qui ne parviennent toutefois pas à les employer à bon escient ou qui négligent une partie des concepts nécessaires. Comme cette description ressemble à comment diSessa (1993) décrivait la situation conceptuelle d'étudiants qui donnaient des réponses incorrectes à des problèmes de physique, le changement conceptuel tel qu'il le propose est peut-être une voie intéressante à explorer pour ces difficultés particulières. Les carences, quant à elle, lorsqu'elles sont identifiées, montrent un échec de l'apprentissage. L'enseignement doit y remédier, sans toutefois viser le changement conceptuel comme tel, parce qu'il semble n'y avoir pas de conception alternative présente, mais plutôt l'absence d'une connaissance.

Un seul agencement incorrect de concepts par ailleurs corrects a été observée chez plus de 10 % des étudiants, et deux seulement au total parmi toutes les difficultés observées. Comme c'est ce modèle du raisonnement qui s'approche le plus de la contravention à la logique, il n'est pas possible de conclure dans le même sens que les chercheurs précédents (par exemple, Torkia-Lagacé, 1981) sur la capacité de raisonner en respectant la logique des étudiants collégiaux québécois. Ainsi, une recherche plus spécifique sur les capacités de raisonnement logique des étudiants serait nécessaire pour tirer une conclusion sur leurs véritables capacités logiques. Ce n'est probablement pas la seule occurrence dans laquelle les étudiants éprouvent des difficultés à raisonner en respectant la logique formelle, mais les résultats du MPP ne permettent pas d'identifier toutes les erreurs logiques qui existent peut-être dans le raisonnement des étudiants.

4. *Par quels processus modèles mentaux → réponse les étudiants collégiaux arrivent-ils à des réponses incorrectes (ou correctes) à des questions en chimie?*

Les processus *modèles mentaux → réponse* qui ont été proposés au chapitre 2 ont effectivement été observés dans le raisonnement d'étudiants collégiaux en chimie, comme il en était question à la sous-section précédente. La classification des difficultés conceptuelles relevées lors de la présente recherche, et présentée plus haut, correspond bien aux causes tacites menant aux réponses manifestes des étudiants en chimie.

Du côté tacite, on a observé des conceptions alternatives sur tous les sujets à l'étude, qui vont dans le même sens (en nature et en fréquence) que ce que la recherche antérieure montrait, en plus de montrer des conceptions alternatives originales, qui n'avaient jamais été répertoriées jusqu'à maintenant, par exemple « les liaisons hydrogène donnent la forme à la molécule » ou « la forme d'une molécule est causée par sa polarité », des conceptions alternatives classées comme des problèmes de connexion entre des concepts.

Des fragmentations, qui auparavant étaient simplement nommées des conceptions alternatives dans les écrits de recherche, ont aussi été mises en lumière. Ce sont des demi-raisonnements et des simplifications abusives qui ont la propriété de ne pas être complètement en désaccord avec la théorie scientifique; les réponses et les justifications qu'ils mènent les étudiants à faire sont, eux, incorrects, mais les représentations des étudiants ne le sont pas

nécessairement. Le processus du raisonnement menant à la mauvaise réponse (ou à la mauvaise justification) implique ici que les bons concepts sont présents, du côté tacite, mais qu'ils ne sont pas bien employés pour résoudre la tâche. Ce processus est différent de celui mettant en scène des conceptions alternatives, lors duquel peu importe le travail cognitif que déploieraient les étudiants, les jeux sont déjà faits parce que des conceptions alternatives viennent troubler le raisonnement même le plus juste.

Des carences ont aussi été observées, qui même si elles n'étaient pas les plus fréquentes ni les plus diversifiées, rendent le travail des étudiants qui les ont extrêmement difficile. Plusieurs de ces carences étaient en fait des idées très naïves, et étaient présentes chez les étudiants qui démontraient le plus de difficulté à répondre correctement au MPP. La mise en lumière de ces carences du côté tacite de la connaissance illustre bien pourquoi les tâches proposées à certains étudiants ne peuvent pas être résolues, faute d'un bagage conceptuel suffisant.

Un rappel des quatre schémas modèles mentaux → réponse, avec le nombre des répondants ayant montré un raisonnement correspondant à chacun, est présenté à la figure 22.

Schéma A : Mène à une bonne réponse

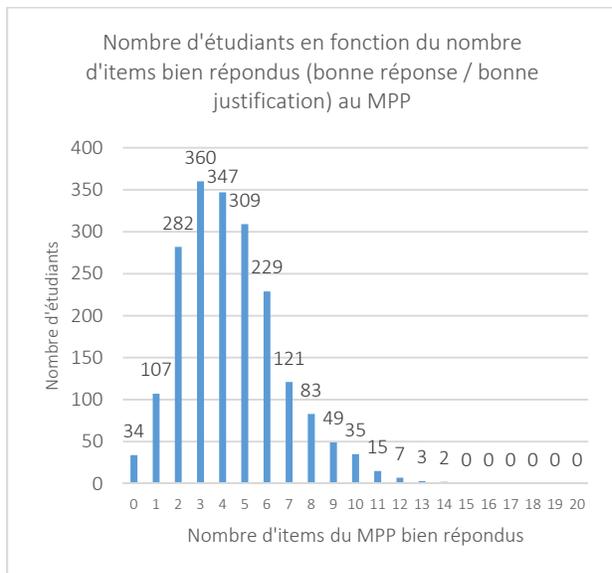


Schéma B : Conception alternative

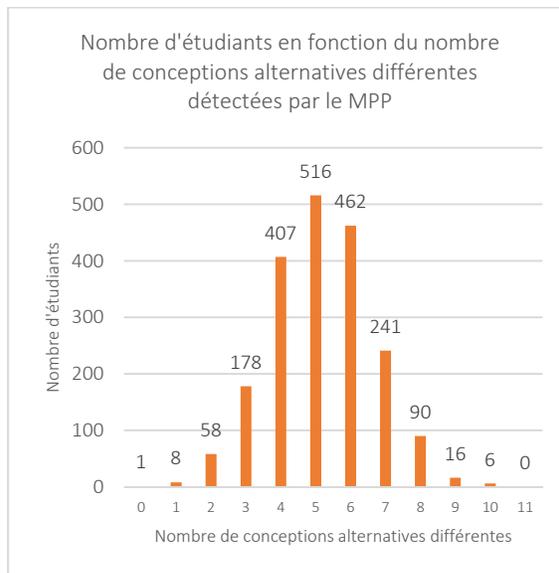


Schéma C : Carence ou fragmentation

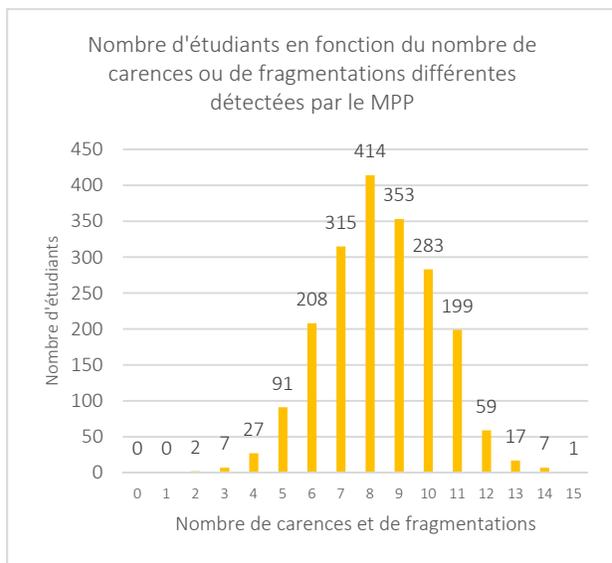


Schéma D : Erreur d'agencement des concepts

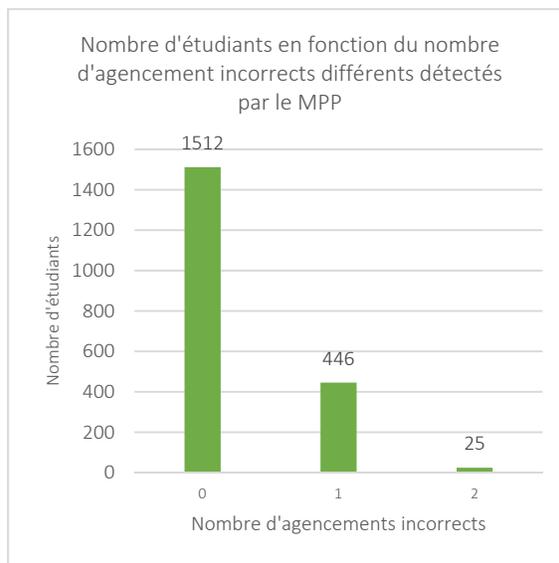


Figure 22 : Nombre d'étudiants ayant montré un raisonnement se classant dans les quatre schémas *modèles mentaux* → *réponse*, en fonction du nombre d'items du MPP (Schéma A) ou du nombre de difficultés identifiées (pour chaque autre schéma)

Au schéma A, on voit qu'aucun étudiant n'a eu plus que 14 bonnes réponses / bonnes justifications sur les 20 items du MPP. La moyenne est de 4,4 sur 20 (écart-type de 2,3), ce qui

montre que ces items identifient effectivement de nombreuses difficultés conceptuelles chez les étudiants collégiaux.

En effet, au schéma B, on voit que la moyenne de conceptions alternatives est autour de 5 conceptions alternatives (précisément, 5,2 avec un écart-type de 1,5), sur un total de vingt possibles telles qu'identifiées par le MPP. Aucun étudiant n'a démontré la présence de ces vingt conceptions alternatives différentes, mais plusieurs d'entre eux en avaient sept ou plus (soit 353 étudiants, ce qui représente près de 18 % de l'échantillon complet).

Les conceptions alternatives ne sont toutefois pas les seules difficultés conceptuelles identifiées par le MPP, comme il était question à la section précédente. En effet, ce test permettait de mettre en lumière pas moins de quarante-sept carences conceptuelles ou fragmentations des connaissances différentes. La distribution de ces difficultés conceptuelles est présentée au schéma C de la figure 22. La moyenne de carences ou de fragmentations différentes est de 8,4 par étudiant (écart-type de 1,9), ce qui en fait donc le schéma le plus représenté par les réponses au MPP. Ainsi, ce ne sont pas principalement des conceptions alternatives dans l'esprit des étudiants qui causent les mauvaises réponses au MPP, mais ce sont souvent des manques de connaissances (fragmentations ou carences) qui les expliquent.

Le raisonnement au schéma D (agencement incorrect) est quant à lui assez marginal chez les étudiants ayant répondu au MPP. En effet, la vaste majorité des étudiants (1512 sur 1983) n'ont pas montré cette difficulté conceptuelle. Il faut préciser que l'agencement incorrect de concepts par ailleurs correct n'était pas attendu lors de l'élaboration des instruments de mesure de la présente recherche, ainsi peu d'items ne permettaient de le voir en réalité. Il est tout de même pertinent de savoir que plusieurs étudiants (471, soit près de 24 % de l'échantillon) construisent des raisonnements qui peuvent paraître illogiques étant donné qu'ils utilisent des concepts corrects pour arriver à une réponse incorrecte.

Cette recherche s'est appliquée à mettre en lumière ces difficultés conceptuelles, les catégories et les schémas auxquels elles appartiennent, et à vérifier leur distribution dans la population étudiante collégiale; ses résultats présentent ainsi un portrait nuancé et éclairé de la situation conceptuelle des étudiants de chimie de cette population.

7 Conclusion

7.1 Rappel de la recherche

Les difficultés conceptuelles des étudiants collégiaux québécois en Sciences de la nature sur des concepts de chimie sont nombreuses et mènent ces étudiants à faire des prédictions ou à donner des explications incorrectes quant au comportement de la matière. Les difficultés conceptuelles des étudiants étaient anticipées avant le début de la présente recherche, mais leur ampleur, leur fréquence et leur étendue ont tout de même surpris la chercheuse.

Le processus par lequel les étudiants arrivent à des réponses incorrectes à des questions demandant de prédire le comportement de la matière ou de l'expliquer n'est pas univoque : ce peut être les concepts qui sont reconstruits incorrectement dans l'esprit des étudiants; ce peut être qu'il leur manque des connaissances; ce peut aussi être qu'ils ont des difficultés à raisonner logiquement. Ces conceptions alternatives et types de raisonnement avaient déjà été étudiés par la communauté de recherche en didactique des sciences, mais aucune typologie satisfaisante pour les processus de raisonnement n'était disponible, et les recherches n'avaient jamais été menées au Québec, ce qui posait la question de la généralisabilité des résultats à la population collégiale québécoise.

Dans l'esprit de ces lacunes de la recherche antérieure, la présente recherche doctorale a permis de répondre à des questions de recherche pertinentes pour la didactique de la chimie au collégial, un domaine qui avait été assez peu étudié, tous sous-domaines confondus, par les chercheurs en didactique jusqu'à aujourd'hui. À travers cette recherche, une proposition de quatre modèles pour le processus menant des modèles mentaux aux réponses (bonnes ou mauvaises) en chimie a permis de nuancer ce qui se classait précédemment comme des conceptions alternatives, qui n'est en fait pas l'étiquette la plus appropriée à accoler à certaines difficultés conceptuelles que rencontrent les étudiants. Ces difficultés conceptuelles peuvent aussi être dues à la fragmentation des connaissances antérieures, voire à leur carence, ou encore à des erreurs dans le raisonnement logique.

La phase pilote de la recherche a permis de mesurer l'étendue de ces difficultés conceptuelles, alors que la phase principale a quant à elle quantifié les différentes classes de difficultés. Un instrument de cueillette de données, le questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes » a été développé durant la phase pilote et utilisé durant la phase principale. Cet instrument, basé sur la méthode Treagust (1988) a toutefois poussé plus loin le design méthodologique en utilisant la plateforme Web ConSOL, développée elle aussi durant le cadre de la présente étude par l'équipe de recherche dirigée par le professeur Jesús Vázquez-Abad, dont faisait partie la chercheuse et en collaboration avec elle (Vázquez-Abad et coll., 2013). Cette plateforme a permis de contourner les faiblesses identifiées pour les questionnaires conceptuels à deux paliers traditionnels.

Non seulement de nombreuses difficultés conceptuelles ont été mises en lumière, mais en plus la recherche a permis de montrer que l'enseignement traditionnel de la chimie ne permettait généralement pas de faire diminuer leur fréquence dans l'esprit des étudiants du programme de Sciences de la nature. Sur la base de ces résultats et d'une recension des écrits de recherche pertinents, de nombreuses suggestions pour l'enseignement ont été formulées, qui pourraient permettre d'améliorer les habiletés de prédiction et d'explication en chimie des étudiants, améliorant du coup leur apprentissage de cette discipline.

7.2 Limites de la recherche

Un avantage de cette recherche est d'avoir questionné un très grand nombre d'étudiants, durant la phase principale. Pour atteindre ce grand nombre de participants, un questionnaire à deux paliers à choix multiples a été utilisé pour l'investigation des conceptions alternatives, une méthode que plusieurs groupes de recherche ont utilisée au fil des ans (Peterson & Treagust, 1989; Coll & Treagust, 2002; Othman, Treagust, & Chandrasegaran, 2008). Cette méthode permet de questionner un grand nombre de participants, mais n'a pas le pouvoir holistique de l'entrevue individuelle, qui permet de cerner précisément la pensée des étudiants; les choix de réponse ici étaient fournis aux répondants, et ceux-ci devaient choisir celui qui correspondait le plus à ce qu'ils pensaient réellement. La façon dont l'outil a été construit ainsi que la plateforme Web sur laquelle la passation a eu lieu ont toutefois contrebalancé cette faiblesse. D'abord, les

choix de réponses au deuxième palier, qui présentaient des justifications, ont été conçus en se basant sur de vraies explications d'étudiants, recueillies durant la phase pilote de l'étude. Ensuite, la plateforme Web ConSOL, en proposant des justifications différentes aux étudiants selon le choix de réponse qu'ils avaient fait au premier palier, permettait d'offrir jusqu'à neuf justifications par question, rapprochant ainsi les choix des étudiants de la justification qu'ils auraient donnée naturellement. De plus, la comparaison des résultats de la phase pilote et de ceux de la phase principale permet de voir que les réponses obtenues grâce au test à deux paliers à choix multiples ressemblent à celles fournies aux questions à justification ouverte.

Une façon de valider davantage les résultats serait de mener des entrevues en parallèle de la réponse au questionnaire sur la plateforme Web avec un même échantillon d'étudiants, afin de comparer ces deux méthodes pour déceler les conceptions et de valider que le questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes » décèle les mêmes conceptions que ne le feraient des entrevues. Il faut tout de même garder à l'esprit que, même lors d'entrevues, les chercheurs s'exposent à commettre des erreurs d'interprétation des réponses des étudiants (García Franco & Taber, 2009). On gagnerait donc à utiliser conjointement les deux méthodes pour découvrir les conceptions alternatives chez les étudiants de Sciences de la nature.

Ensuite, la méthode développée par Treagust ne permet pas, comme le faisait remarquer Robitaille (1997) dans une recherche semblable à celle présentée ici, « d'expliquer comment s'opère le changement de la structure cognitive de l'élève » (p. 176). En effet, la recherche qui a été menée ici, comme la plupart des recherches suivant la méthode de Treagust, ne s'intéresse pas à suivre l'évolution conceptuelle, voire le changement conceptuel, des étudiants, mais plutôt à tracer un portrait de la situation cognitive de ceux-ci à un moment donné. Toutefois, et bien que ce n'était pas chez les mêmes étudiants, une progression conceptuelle a tout de même pu être dégagée des résultats, en comparant la fréquence des difficultés conceptuelles des étudiants au fil des cours qu'ils suivaient durant le programme de Sciences de la nature. L'étude de cette « progression » conceptuelle a montré que la plupart des difficultés conceptuelles ne changent en réalité pas au fur et à mesure que les étudiants suivent plus de cours traditionnels de chimie, montrant encore une fois la nécessité de développer des stratégies d'enseignement ou des dispositifs didactiques spécifiques pour permettre une véritable amélioration conceptuelle chez

les étudiants en chimie. Cette amélioration conceptuelle devra être développée et mesurée par d'autres moyens et dans d'autres cadres que ceux présentés ici.

De plus, étant donné le choix des étudiants de Sciences de la nature du collégial québécois comme population visée ici, les résultats qui ont été mis en lumière dans cette étude ne s'appliquent directement qu'à eux. Pour généraliser les conclusions aux autres populations étudiantes, des études supplémentaires seraient probablement nécessaires. Toutefois, comme les résultats obtenus aux items tirés de recherches antérieures sont semblables pour les étudiants québécois et les populations originales, il est raisonnable d'émettre l'hypothèse que ceux des items créés pour le MPP durant la présente recherche obtiendraient les mêmes résultats ailleurs dans le monde aussi.

Une autre limite de la recherche concerne l'analyse des données brutes obtenues lors des phases préliminaire et pilote. Des interprétations, des recoupements et des inférences ont effectivement été faits, que pouvait teinter la compréhension de la chercheuse de ce que voulaient dire les étudiants. Lors de la phase pilote, un enseignant de chimie a été consulté lors de cette interprétation; lors de la phase principale, un deuxième enseignant de chimie a participé à associer les difficultés conceptuelles aux choix de réponses. Malgré la bonne foi, les erreurs d'interprétation auraient pu survenir quand même. De la phase pilote à la phase principale, pour assurer la fiabilité des items du questionnaire final, la rédaction la plus claire possible a été réalisée pour les items du questionnaire. Certaines « conceptions alternatives » détectées comme telles n'en sont peut-être pas réellement : les conceptions sont des constructions mentales, des idées assez ancrées. Or, il est possible que certains étudiants aient répondu à certaines questions comme ils l'ont fait à défaut de connaître le sujet; au lieu d'une conception alternative, ces étudiants auraient donc simplement manifesté un manque de connaissances. Il est impossible de confirmer la teneur des conceptions alternatives observées, c'est-à-dire de préciser si elles sont profondément ancrées ou si elles résultent d'une réponse spontanée basée sur de l'ignorance. Les résultats sur la résistance dans le temps de certaines conceptions (à la section 5.4) permettent de nuancer cette limite : en effet, lorsque plusieurs cohortes successives d'étudiants répondent de la même façon, c'est peut-être parce que ces étudiants ont des conceptions effectivement bien ancrées.

Mais même si les résultats du questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes » ne révélèrent qu'un manque de connaissance chez plusieurs étudiants, ils demeureraient d'intérêt pour les enseignants, car un tel manque, tout comme les conceptions alternatives, est le produit d'un apprentissage qui n'est pas réussi. La nature des réponses données lors de la phase pilote, avec justifications ouvertes, tend toutefois à montrer que les réponses des étudiants ne provenaient pas uniquement de leur méconnaissance. En effet, la façon dont ils expliquaient leurs choix de réponse montrait bien des représentations qui étaient des conceptions alternatives.

Une autre limite de cette recherche concerne le design expérimental. Avec les informations recueillies sur chacun des étudiants, il est impossible de comparer leur score au test à leurs résultats scolaires. En effet, les étudiants qui ont participé à l'étude n'ont pas donné l'information qui aurait pu servir à associer un dossier scolaire à un questionnaire rempli sur ConSOL. Cette précaution avait été prise délibérément pour préserver l'anonymat des étudiants; reste qu'elle fait en sorte qu'une certaine forme d'analyse des données ne peut pas être réalisée. Il serait intéressant, à l'avenir, de réaliser une telle comparaison entre les notes scolaires et le score obtenu au test « Molécules, polarité et phénomènes ».

Enfin, une dernière limite de cette recherche concerne les recommandations formulées pour l'enseignement des concepts de chimie. Comme la recherche ne visait pas le développement d'outils didactiques ni l'étude systématique de l'effet de ceux-ci sur l'apprentissage, les recommandations faites ici ne sont que des pistes de solutions à explorer par les enseignants qui souhaitent que leurs étudiants sortent de la classe en ayant laissé tomber certaines des conceptions alternatives qu'ils possédaient en arrivant et qu'ils aient réalisé un véritable apprentissage conceptuel. Ces suggestions mériteraient d'être validées par la recherche afin de mesurer leur impact sur l'apprentissage.

Il demeure que certaines recommandations peuvent être formulées, notamment à propos des outils technologiques qui existent maintenant et qui permettent aux enseignants de faciliter la difficile transition entre les domaines macroscopique, sous-microscopique et symbolique en chimie. Quelques suggestions sont présentées à la section suivante.

7.3 Quelques outils pour les enseignants

On l'a vu, les difficultés conceptuelles des étudiants sont répandues à travers la population étudiante et méritent qu'on s'y attaque spécifiquement en classe de chimie, pour faciliter le changement conceptuel. Certains dispositifs didactiques, développés par des chercheurs en éducation, sont disponibles pour les enseignants et sont certainement des atouts qu'ils et elles devraient considérer utiliser dans leurs classes. Dans cette section seront présentés quelques-uns de ces outils, avec une emphase particulière sur les outils technologiques développés pour l'enseignement de la chimie dans les dernières années. Il est à noter que cette section est présentée ici pour le bénéfice des enseignants, mais la présente recherche ne visait pas à identifier de tels outils. Il demeure pertinent, toutefois, d'en glisser un mot pour fournir aux enseignants qui le souhaiteraient des ressources pour favoriser le changement conceptuel de leurs étudiants.

Un premier dispositif didactique technologique, développé à Taïwan, traite de la nature corpusculaire de la matière et des habiletés de raisonnement scientifique (She & Liao, 2010). L'intérêt particulier ce dispositif est qu'il présente du matériel didactique multimédia construit de façon adaptative : grâce à quelques questions disséminées à travers les pages du site web, la navigation des élèves est modulée en fonction des réponses qu'ils donnent à ces questions, permettant un échafaudage conceptuel¹⁶ de leurs apprentissages. Plusieurs de ces questions demandant aux élèves de poser des hypothèses ou de faire des prédictions, leur capacité de raisonner est stimulée en même temps que les notions de chimie sont apprises. Une étude empirique a montré que les élèves qui ont utilisé ce dispositif durant quelques semaines en classe ont amélioré leur compréhension de la nature corpusculaire de la matière et leur capacité de raisonnement. Toutefois, le design expérimental ne permettait pas de distinguer l'effet du dispositif sur cette amélioration, car le gain des élèves n'était pas comparé à celui d'un groupe contrôle.

Deux autres dispositifs didactiques technologiques, l'un sur la structure de la matière et la réaction chimique (Ardac & Akaygun, 2004), l'autre sur la liaison chimique (Frailich, Kesner,

¹⁶ En anglais, *conceptual scaffolding*.

& Hofstein, 2009) ont ceci en commun de mettre en parallèle les domaines macroscopique et sous-microscopique. En effet, de façon très intéressante, on montre à l'écran par exemple une photo d'un composé chimique ou une vidéo d'une réaction qui se déroule, et dans le même écran, un modèle tridimensionnel des molécules concernées (Ardac & Akaygun, 2004). Dans l'autre dispositif (Frailich, et al., 2009), on présente des aussi photos, vidéo et représentations, mais en plus, le site web est utilisé en classe comme activité pédagogique, car il permet d'encadrer les élèves dans leur apprentissage. On tire aussi profit d'être en ligne pour demander aux élèves de faire des recherches supplémentaires sur d'autres sites Web. Ce dispositif est complet et complexe, et a d'ailleurs été implanté comme nouvelle méthode pour enseigner la liaison chimique à tous les élèves de 10^e année de tout l'Israël, le déploiement s'étant fait durant l'année scolaire 2010-2011. Les résultats de l'étude préalable au déploiement de ce dispositif sont enthousiasmants : les animations couplées aux photos du monde « macroscopique » ont permis aux élèves de faire le lien entre les domaines du savoir en chimie et comment les modèles sous-microscopiques permettent d'expliquer les propriétés observables. Les résultats comparés avec un groupe contrôle montrent une différence significative dans la performance des élèves et dans leur compréhension de la liaison chimique.

En général, il est noté par les chercheurs que lorsque le matériel est adaptatif ou qu'il donne une rétroaction, la fréquence des conceptions alternatives des élèves diminue (Appling & Peake, 2004; She & Liao, 2010) et leur capacité de raisonnement scientifique augmente (She & Liao, 2010). Le changement conceptuel n'étant pas qu'un remplacement de contenu, mais aussi une amélioration de la capacité à raisonner relativement à des problèmes (Furió, et coll., 2000), cette rétroaction dans un dispositif serait essentielle pour favoriser le changement conceptuel.

En plus des activités d'apprentissage à faire en ligne, il existe aussi des simulateurs informatisés, qui permettent de faire des observations et de vérifier des prédictions à l'échelle sous-microscopique. Parmi eux, des simulateurs existent pour faire la modélisation moléculaire. Ce sont des *simulateurs* au sens où ces logiciels laissent le contrôle à l'utilisateur des paramètres de visualisation et de construction, de façon à permettre aux élèves de développer et de tester leurs propres idées (Chang, Quintana, & Krajcik, 2010). Leur autre avantage sur les logiciels de visualisation est qu'ils permettent une plus grande interactivité, puisqu'ils peuvent être utilisés pour construire des molécules à l'écran un peu comme un kit de modélisation physique le

permettait. Leurs avantages sur le kit sont qu'ils sont moins encombrants, qu'ils coûtent moins cher (plusieurs sont d'accès libre ou gratuit pour l'éducation) et qu'ils simplifient la manipulation des molécules (une fois qu'on a maîtrisé les commandes).

Plusieurs logiciels pour la modélisation pour lesquels des recherches ont été répertoriées dans la littérature, dont *eChem* (Wu, Krajcik, & Soloway, 2001), *Chemation* (Chang, et al., 2010), *Jmol* (Bottomley, Chandler, Morgan, & Helmerhorst, 2006), *ChemSketch* (Aksela & Lundell, 2008).

Parmi eux, *eChem*, développé pour les élèves de 11^e année (équivalent de la cinquième secondaire), est une version simplifiée pour les jeunes des logiciels plus avancés de modélisation (comme *ChemSketch*). Seules les commandes les plus communes sont conservées dans l'interface, réduisant le temps d'apprentissage du logiciel. Un grand avantage sur les autres logiciels est qu'il permet la représentation simultanée (dans le même écran) de la même molécule en plusieurs modèles différents (boules et bâtonnets, remplissage, fil de fer, etc.), ce qui permet aux élèves de les distinguer rapidement. Dans l'étude de l'implantation du logiciel pendant plusieurs semaines en classe de chimie, les chercheurs ont noté que les élèves démontraient un grand engagement dans la tâche et qu'ils avaient amélioré leur habileté à traduire une formule bidimensionnelle en modèle tridimensionnel (Wu, et al., 2001).

Une version plus avancée du logiciel est toutefois nécessaire pour les cours optionnels de chimie organique du cégep. C'est pourquoi l'option du logiciel *ChemSketch* est une avenue à considérer. Ce logiciel, développé par la compagnie *ACD/Labs*, est gratuit pour les utilisateurs en éducation (enseignants, étudiants et même pour installation dans les laboratoires informatiques des écoles). Son utilisation par des enseignants et des professeurs de chimie a été sondée dans une étude de cas (Aksela & Lundell, 2008). Parmi les résultats de cette étude, les enseignants et professeurs ont fait ressortir les caractéristiques d'un bon logiciel de modélisation moléculaire : il devrait être facile d'utilisation, illustratif (doit pouvoir permettre de visualiser des concepts abstraits) et visuellement agréable, il devrait permettre de faire tourner les molécules et de les nommer, il devrait permettre des défis de degré varié pour les élèves de différents niveaux, il ne devrait pas être dispendieux et il devrait présenter des instructions claires et une option d'aide. Tous ces critères sont rencontrés par *ChemSketch*, sauf peut-être celui concernant les défis de degré varié : *ChemSketch* est un logiciel de modélisation

moléculaire, pas un dispositif didactique, il ne contient pas d'activités d'apprentissage. Il est toutefois possible d'en construire, et ceci, en se basant sur des activités d'apprentissage développées dans des environnements différents.

Murphy (Murphy, 2007) propose une activité d'apprentissage où les étudiants doivent induire l'influence des caractéristiques structurales des molécules (masse moléculaire, polarité, présence de ramifications, etc.) sur la température d'ébullition des substances qu'elles constituent. Dans cette activité, les masses moléculaires, le nom des composés et les températures d'ébullition sont fournis aux élèves. On pourrait imaginer une telle activité où les élèves n'auraient en leur possession que le nom des composés. Ils devraient construire une molécule de chacun à l'aide du logiciel de modélisation moléculaire, ce qui leur permettrait de visualiser les caractéristiques structurales comme la ramification et la masse moléculaire, qui est calculée automatiquement par le logiciel. Les élèves pourraient même avoir à faire une courte recherche sur le web pour trouver les points d'ébullition des composés, ce qui stimulerait une habileté de recherche d'informations qui est authentique par rapport au travail des chimistes (She & Liao, 2010). Dans le cadre d'une telle activité, les élèves prendraient conscience de la relation structure des molécules/propriétés des substances et développeraient leur habileté de raisonnement inductif.

D'autres simulateurs gratuits, développés par une équipe de recherche universitaire, sont regroupés sur le site *Web PhET – Interactive simulations*, préparé par l'Université du Colorado à Boulder. En plus des simulateurs, ce site Web regroupe des activités pédagogiques, développées par des enseignants et rendues disponibles gratuitement, à faire en classe avec les simulateurs. Par exemple, une activité prévue pour une classe avec télévotants existe sur le simulateur de polarité moléculaire (*Molecular Polarity*), qui présente des questions conceptuelles à travailler avec les étudiants dans une classe. Ces questions visent à faire développer aux étudiants les concepts de polarité des liaisons, de vecteur de moment dipolaire et de distinction entre liaison non polaire, très polaire et peu polaire. Les avantages du site PhET sont que la création des simulateurs est supervisée par des équipes de chercheurs en éducation, et le nombre de simulateurs est très grand, permettant à des enseignants de toute discipline scientifique d'y trouver son compte.

7.4 Pistes à explorer

À la suite de ces limites, il est pertinent de proposer quelques pistes que pourraient emprunter les chercheurs en didactique des sciences pour arriver à des résultats qu'il serait intéressant de comparer à ceux de cette recherche.

D'abord, à la lumière des résultats obtenus lors de la phase pilote par les étudiants au baccalauréat en enseignement des sciences et technologies, il serait intéressant de fouiller cet aperçu en demandant à un échantillon d'entre eux de répondre au test « Molécules, polarité et phénomènes ». En effet, ces étudiants étant les futurs enseignants de sciences des écoles secondaires, il serait souhaitable qu'ils n'aient pas de conceptions alternatives sur des sujets de base en chimie. Vérifier si cette population possède de telles conceptions serait une première étape, avant de penser à procéder avec elle à un changement conceptuel.

Toujours à propos des résultats obtenus, il est intéressant de noter que plusieurs difficultés conceptuelles des étudiants du programme de Sciences de la nature semblent reliées à des difficultés quant à la compréhension des attractions et répulsions électromagnétiques. Bien que cela ne faisait pas partie des questions de la présente recherche, une recherche subséquente pourrait s'intéresser au lien entre les difficultés conceptuelles en chimie et en physique, en particulier en questionnant avec le MPP des étudiants qui ont suivi ou non le cours 203-NYB-05 « Électricité et magnétisme », un cours de physique obligatoire du programme de Sciences de la nature.

Ensuite, il serait sûrement intéressant de mener les entrevues dont il a été question précédemment, en parallèle avec les étudiants qui répondent aussi au questionnaire. En plus de permettre de valider que le test de la présente étude détecte les mêmes conceptions que les entrevues, celles-ci permettraient d'approfondir la compréhension des conceptions alternatives que possèdent les étudiants sur les concepts de molécules, polarité, liaisons chimiques et phénomènes macroscopiques, et ainsi éclairer différemment les résultats obtenus lors de cette étude.

Enfin, cette étude a permis de classer les difficultés conceptuelles dans des catégories de conceptions, fragmentations, carences et erreurs logiques, catégories émergentes dont cette thèse a présenté la typologie. Cette dernière, de même que les catégories qui la composent et la

façon dont elle peut être utilisée pour favoriser le changement conceptuel des étudiants, mériterait d'être validée et étudiée davantage.

Bibliographie

- Aksela, M., & Lundell, J. (2008). Computer-based molecular modelling: Finnish school teachers' experiences and views. *Chemistry Education Research and Practice*, 9(4), 301-308.
- Albanese, A., & Vicentini, M. (1997). Why do we believe that an atom is colourless? Reflections about the teaching of the particle model. *Science & Education*, 6(3), 251-261.
- Appling, J. R., & Peake, L. C. (2004). Instructional technology and molecular visualization. *Journal of Science Education and Technology*, 13(3), 361-365.
- Ardac, D., & Akaygun, S. (2004). Effectiveness of multimedia-based instruction that emphasizes molecular representations on students' understanding of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(4), 317-337.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y., & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences*. (2^e éd.). Bruxelles: de Boeck Université.
- Astolfi, J.-P., & Develay, M. (2002). *La didactique des sciences*. (6^e éd.). Paris: PUF.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York, NY: Holt, Rinehart & Winston.
- Ausubel, D. P., Novak, J. D., & Hanesian, H. (1978). *Educational psychology: A cognitive view*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Ayas, A., Özmen, H., & Çalik, M. (2010). Students' conceptions of the particulate nature of matter at secondary and tertiary level. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8, 165-184.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Banerjee, A. C. (1991). Misconceptions of students and teachers in chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 13(4), 487-494.
- Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S., & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64-66.
- Beth, E. W., & Piaget, J. (1966). *Mathematical epistemology and psychology*. New York, NY: Gordon and Breach.
- Bêty, M.-N. (2009). *Les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire : état de la question*. (Université de Montréal, Montréal).
- Bird, L. (2010). Logical reasoning ability and student performance in general chemistry. *Journal of Chemical Education*, 87(5), 541-546. doi: 10.1021/ed8001754
- Birk, J. P., & Kurtz, M. J. (1999). Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding. *Journal of Chemical Education*, 79(1), 124-128.
- Blanco, R., & Niaz, M. (1998). Baroque tower on a Gothic base: A Lakatosian reconstruction of students' and teachers' understanding of structure of the atom. *Science & Education*, 7(4), 327-360.
- Bodner, G. M. (1991). I have found you an argument: The conceptual knowledge of beginning chemistry graduate students. *Journal of Chemical Education*, 68(5), 385-388.
- Bodner, G. M., & Guay, R., B. (1997). The Purdue Visualization of Rotations test. *The Chemical Educator*, 2(4), 1-17.

- Boo, H. K. (1998). Students' understandings of chemical bonds and the energetics of chemical reactions. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(5), 569-581.
- Bottomley, S., Chandler, D., Morgan, E., & Helmerhorst, E. (2006). jAMVLE, a new integrated molecular visualization learning environment. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 34(5), 343-349.
- Boutot, A. (2012). Sciences - Science et philosophie. *Encyclopædia Universalis*. Repéré à <http://www.universalis.fr/encyclopedie/sciences-science-et-philosophie/>
- Brazhkin, V. V., & Trachenko, K. (2012). What separates a liquid from a gas? *Physics Today*, 65(11), 68-69.
- Bruner, J. (1960). *The process of education*. Cambridge, MA.: Harvard University Press.
- Bucat, B., & Mocerino, M. (2009). Learning at the sub-micro level: Structural representations. Dans J. K. Gilbert & D. F. Treagust (dir.), *Multiple Representations in Chemistry Education* (p. 11-29). The Netherlands: Springer.
- Butts, B., & Smith, R. (1987). HSC chemistry students' understanding of the structure and properties of molecular and ionic compounds. *Research in Science Education*, 17(1), 192-201.
- Çalik, M., & Ayas, A. (2005). A comparison of level of understanding of eighth-grade students and science student teachers related to selected chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(6), 638-667.
- Çalik, M., Ayas, A., & Coll, R. K. (2010). Investigating the effectiveness of teaching methods based on a four-step constructivist strategy. *Journal of Science Education and Technology*, 19, 32-48.
- Cantu, L. L., & Herron, D. J. (1978). Concrete and formal piagetian stages and science concept attainment. *Journal of Research in Science Teaching*, 15(2), 135-143.
- Cégep André-Laurendeau. (2014). Tableaux de bord A08-A13 - réussite des cours. Montréal (QC).
- Chandrasegaran, A. L., Treagust, D. F., & Mocerino, M. (2007). The development of a two-tier multiple-choice diagnostic instrument for evaluating secondary school students' ability to describe and explain chemical reactions using multiple levels of representation. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(3), 293-307.
- Chang, H.-Y., Quintana, C., & Krajcik, J. S. (2010). The impact of designing and evaluating molecular animations on how well middle school students understand the particulate nature of matter. *Science Education*, 94(1), 73-94.
- Chang, J.-Y. (1999). Teachers college students' conceptions about evaporation, condensation, and boiling. *Science Education*, 83(5), 511-526.
- Chang, R., & Papillon, L. (2009). *Chimie générale, 3e édition*. Montréal: Chenelière McGraw-Hill.
- Christian, K., & Talanquer, V. (2012). Modes of reasoning in self-initiated study groups in chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 286-295.
- Chu, H.-E., Treagust, D. F., & Chandrasegaran, A. L. (2009). A stratified study of students' understanding of basic optics concepts in different contexts using two-tier multiple-choice items. *International Journal of Science Education*, 27(3), 253-265.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Coll, R. K., & Taylor, N. (2001). Alternative conceptions of chemical bonding held by upper secondary and tertiary students. *Research in Science & Technological Education*, 19(2), 171-191.
- Coll, R. K., & Treagust, D. F. (2001). Learners' mental models of chemical bonding. *Research in Science Education*, 31(3), 357-382.
- Coll, R. K., & Treagust, D. F. (2003). Learners' mental models of metallic bonding: A cross-age study. *Science Education*, 87(5), 685-707.
- Cormier, C. (2012, 7 juin). *Les conceptions alternatives en chimie d'étudiants postsecondaires: identification par un questionnaire diagnostique à deux paliers*. Communication présentée à XVIIe Congrès de l'Association Mondiale des Sciences de l'Éducation, Reims, France.
- Cormier, C. (2013, April 6-9). *A novel typology for alternative conceptions in postsecondary chemistry identified by a two-tier diagnostic instrument*. Communication présentée à 2013 NARST Annual International Conference, San Juan, Puerto Rico.
- Cormier, C., & Vázquez-Abad, J. (2011). *Exploring alternative conceptions on molecular geometry in postsecondary chemistry education*. Communication présentée à 2011 NARST Annual International Conference, Orlando, FL.
- Corriveau, L. (1991). *Les cégeps, question d'avenir*. Québec, QC: Institut québécois de recherche sur la culture.
- Couture, I., & Peyronnet, O. (2008). *Synergie, 2e cycle du secondaire, 2e année*. Montréal, Qc: Chenelière Éducation.
- Cyr, M.-D. (2010). *Option Science, Chimie, Cahier de savoirs et d'activités, 5e secondaire*. Saint-Laurent, Qc: Éditions du Renouveau Pédagogique inc.
- De Posada, J. M. (1997). Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: Structure and evolution. *Science Education*, 81(4), 445-467.
- diSessa, A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2/3), 105-225.
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Duis, J. (2011). Organic chemistry educators' perspectives on fundamental concepts and misconceptions: An exploratory study. *Journal of Chemical Education*, 88(3), 346-350.
- Duit, R. (2011). *Symposium - Distinguished Contributions in Research*. Communication présentée à NARST 2011 International Annual Conference, Orlando, FL.
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Ferguson, R. L., & Bodner, G. M. (2008). Making sense of arrow-pushing formalism among chemistry majors enrolled in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 9, 102-113.
- Festinger, L. (1962). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford, CA: Stanford University Press.
- Fetherstonhaugh, T., & Treagust, D. (1992). Students' understanding of light and its properties: Teaching to engender conceptual change. *Science Education*, 76(6), 653-672.
- Feynman, R. P. (1963, éd. 1995). *Six easy pieces*. Cambridge, MA: Basic Books.

- Flamand, E., & Allard, J.-L. (2004). *Chimie générale*. (2^e éd.). Mont-Royal: Modulo Éditeur.
- Fourez, G. (1996). *La construction des sciences*. (3^e éd.). Bruxelles: De Boeck Université.
- Frailich, M., Kesner, M., & Hofstein, A. (2009). Enhancing Students' Understanding of the Concept of Chemical Bonding by Using Activities Provided on an Interactive Website. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(3), 289-310.
- Furió, C., & Calatayud, M. L. (1996). Difficulties with the geometry and polarity of molecules. *Journal of Chemical Education*, 73(1), 36-41.
- Furió, C., Calatayud, M. L., Barcenás, S. L., & Padilla, O. M. (2000). Functional fixedness and functional reduction as common sense reasonings in chemical equilibrium and in geometry and polarity of molecules. *Science Education*, 84(5), 545-565.
- Gabel, D. L., Samuel, K. V., & Hunn, D. (1987). Understanding the particulate nature of matter. *Journal of Chemical Education*, 64(8), 695-697.
- García Franco, A., & Taber, K. S. (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. doi: 10.1080/09500690802307730
- Garnett, P. J., Garnett, P. J., & Hackling, M. W. (1995). Students' alternative conceptions in chemistry: A review of research and implications for teaching and learning. *Studies in Science Education*, 25, 69-95.
- Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (1999). Betting on one good reason: The Take The Best heuristic. Dans G. Gigerenzer, D. G. Goldstein & P. Todd (dir.), *Simple heuristics that make us smart*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Gilbert, J. K., & Treagust, D. F. (2009). Macro, submicro, and symbolic representations and the relationship between them: Key models in chemical education. Dans J. K. Gilbert & D. F. Treagust (dir.), *Multiple Representations in Chemistry Education* (p. 1-8). The Netherlands: Springer.
- Gillespie, R. J. (1997). The great ideas of chemistry. *Journal of Chemical Education*, 74(7), 862-864.
- Grève étudiante québécoise de 2012. (2013). *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Repéré à http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Gr%C3%A8ve_%C3%A9tudiante_qu%C3%A9bécoise_de_2012&oldid=94911445.
- 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), 611-628.
- Haidar, A. H. (1997). Prospective chemistry teachers' conceptions of the conservation of matter and related concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(2), 181-197.
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement vs. traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. Arlington, VA: National Science Foundation.
- Handbook of Chemistry and Physics [HCP]. (2013). Dans D. R. Lide (dir.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (89^e édition, version internet^e éd.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Harpin, I., Cormier, C., & Vázquez-Abad, J. (2012) ConSOL. MATI Montréal.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. Dans J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi & D.

- F. Treagust (dir.), *Chemical education: Towards a research-based practice* (p. 189-212). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Hartley, L. M., Wilke, B. J., Schramm, J. W., D'Avanzo, C., & Anderson, C. W. (2011). College students' understanding of the carbon cycle: Contrasting principle-based and informal reasoning. *BioScience*, *61*(1), 65-75.
- Haslam, F., & Treagust, D. F. (1987). Diagnosing secondary students' misconceptions of photosynthesis and respiration in plants using a two-tier multiple-choice instrument. *Journal of Biological Education*, *21*(3), 203-211.
- Henderleiter, J., Smart, R., Anderson, J., & Elian, O. (2001). How do organic chemistry students understand and apply hydrogen bonding? *Journal of Chemical Education*, *78*(8), 1126-1130.
- Herron, J. D. (1996). *The chemistry classroom: Formulas for successful teaching*. Washington, DC: American Chemical Society.
- Hesse, J. J., & Anderson, C. W. (1992). Students' conceptions of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching*, *29*(3), 277-299. doi: 10.1002/tea.3660290307
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G. A. B. (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, *13*(1), 1-13.
- Hill, J. W., Petrucci, R. H., McCreary, T. W., Perry, S. S., & Cantin, R. (2008). *Chimie générale, 2e édition*. Saint-Laurent: Éditions du Renouveau Pédagogique inc.
- Howell, D. C. (2007). *Statistical methods for psychology*. Belmont, CA: Thomson Higher Education.
- IBM Corp. (2012) IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Igaz, C., & Proksa, M. (2012). Conceptual questions and lack of formal reasoning: Are they mutually exclusive? *Journal of Chemical Education*, *89*, 1243-1248.
- IUPAC (1997). *Compendium of chemical terminology*. (2^e éd.).
- Johnson, P. (1998). Children's understanding of changes of state involving the gas state, Part 1: Boiling water and the particle theory. *International Journal of Science Education*, *20*(5), 567-583.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and microchemistry. *School Science Review*, *64*, 377-379.
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, *70*(9), 701-705.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Karsenti, T., & Savoie-Zajc, L. (2004). *La recherche en éducation: étapes et approches*. Sherbrooke: Éditions sur CRP, Faculté d'éducation.
- Kind, V. (2004). *Beyond appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas* (2^e éd.). Repéré à <http://assessment-ws.wikispaces.com/file/view/Beyond-appearances.pdf>
- Kotz, J. C., & Treichel, P. M. (2005). *Chimie générale*. Laval: Groupe Beauchemin.
- Kraft, A., Strickland, A. M., & Bhattacharyya, G. (2010). Reasonable reasoning: Multi-variate problem-solving in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, *11*, 281-292.
- Krajcik, J. S. (1989). *Students' interactions with science software containing dynamic visuals*. Communication présentée à The Annual Meeting of the American Anthropological Association, Washington, DC.

- Krajcik, J. S. (2011). Learning progressions provide road maps for the development and validity of assessments and curriculum materials. *Measurement: Interdisciplinary research & perspective*, 9(2-3), 155-158. doi: 10.1080/15366367.2011.603617
- Krnel, D., Watson, R., Glazar, S. (1998). Survey of research related to the development of the concept of 'matter'. *International Journal of Science Education*, 20(3), 257-289.
- Kuhn, T. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Laszlo, P. (2012). Chimie. *Encyclopædia Universalis*. Repéré à <http://www.universalis.fr/encyclopedie/chimie/>
- Lawson, A. E. (1994). Research on the acquisition of science knowledge: Epistemological foundations of cognition. Dans D. L. Gabel (dir.), *Handbook of Research On Science Teaching and Learning*. New York, NY: Simon & Schuster Macmillan.
- Lee, O., Eichinger, D. C., Anderson, C. W., Berkheimer, G. D., & Blakeslee, T. D. (1993). Changing middle school students' conceptions of matter and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(3), 249-270.
- Levy Nahum, T., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A., & Taber, K. S. (2010). Teaching and learning the concept of chemical bonding. *Studies in Science Education*, 46(2), 179-207.
- Maeyer, J., & Talanquer, V. (2010). The role of intuitive heuristics in students' thinking: Ranking chemical substances. *Science Education*, 94(6), 963-984.
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne: Éditions Peter Lang SA.
- McClary, L. M., & Talanquer, V. (2011). College chemistry students' mental models of acids and acid strength. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(4), 396-413.
- MELS (1998). *Sciences de la nature, Programme d'études préuniversitaires 200.B0*. Québec: Gouvernement du Québec.
- MELS. (2008a). Domaine de la mathématique, de la science et de la technologie; Science et technologie (*Programme de formation de l'école québécoise, Enseignement secondaire, deuxième cycle* : Gouvernement du Québec.
- MELS. (2008b). L'effectif scolaire des établissements d'enseignement collégial. Repéré le 4 février 2010 à http://www.mels.gouv.qc.ca/stat/Stat_det/coll_eff.htm
- Montminy, M. (2009). *Raisonnement et pensée critique : introduction à la logique informelle*. Montréal, QC: Les Presses de l'Université de Montréal.
- Mulford, D. R., & Robinson, W. R. (2002). An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students. *Journal of Chemical Education*, 79(6), 739-744.
- Murphy, P. M. (2007). Teaching structure-property relationships: Investigating molecular structure and boiling point. *Journal of Chemical Education*, 84(1), 97-101.
- Nakhleh, M. B. (1992). Why some students don't learn chemistry. *Journal of Chemical Education*, 69(3), 191-196.
- Nicoll, G. (2001). A report of undergraduates' bonding misconceptions. *International Journal of Science Education*, 23(7), 707-730.
- OCDE. (2007). PISA 2006 : Les compétences scientifiques : un atout pour l'avenir : Organisation de coopération et de développement économiques.
- Osborne, R., & Cosgrove, M. (1983). Children's conceptions of the changes of state in water. *Journal of Research in Science Teaching*, 20, 825-838.
- Othman, J., Treagust, D. F., & Chandrasegaran, A. L. (2008). An investigation into the relationship between students' conceptions of the particulate nature of matter and their

- understanding of chemical bonding. *International Journal of Science Education*, 30(11), 1531-1550.
- Oversby, J. (1996). The ionic bond. *Education in Chemistry*, 33(2), 37-38.
- Özmen, H. (2004). Some student misconceptions in chemistry: A literature review of chemical bonding. *Journal of Science Education and Technology*, 13(2), 147-159.
- Park, E. J., Light, G., Swarat, S., & Drane, D. (2009). *Understanding learning progression in student conceptualization of atomic structure by variation theory for learning*. Communication présentée à Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference, Iowa City, IA.
- Peterson, R. F., Treagust, D. F., & Garnett, P. (1986). Identification of secondary students' misconceptions of covalent bonding and structure concepts using a diagnostic instrument. *Research in Science Education*, 16(1), 40-48.
- Peterson, R. F., Treagust, D. F., & Garnett, P. (1989). Development and application of a diagnostic instrument to evaluate grade-11 and -12 students' concepts of covalent bonding and structure following a course of instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(4), 301-314.
- Pfundt, H., & Duit, R. (2009). *Bibliography: Students' alternative frameworks and science education*. (March 2009^e éd.). Kiel, Germany: University of Kiel.
- Plummer, J. D., Krajcik, J. S., Bell, P., Reiser, B., Duncan, R. G., & Songer, N. B. (2011). *Examining learning progressions beyond content: Strands of scientific proficiency*. Communication présentée à 2011 NARST Annual International Conference, Orlando, FL.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Potvin, P., & Thouin, M. (2003). Étude qualitative d'évolutions conceptuelles en contexte d'explorations libres en physique-mécanique au secondaire. *Revue des sciences de l'éducation*, XXXIX(3), 525-544.
- Provalis Research. (n.d.). QDA Miner 3.2. Repéré le July 13, 2010 à <http://www.provalisresearch.com/QDAMiner/QDAMinerDesc.html>
- Raynal, F., & Rieunier, A. (Dir.). (1997, éd. 2005). *Pédagogie : dictionnaire des concepts clés*. Paris: ESF éditeur.
- Reger, D. L., Goode, S. R., & Mercer, E. E. (2000). *Chimie générale*. Laval: Éditions Études Vivantes.
- Reuter, Y., Cohen-Azria, Daunay, B., Delcambre, I., & Lahanier-Reuter, D. (2013). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. (3^e éd.). Bruxelles: De Boeck Université.
- Roadrangka, V. (1991). The construction of a Group Assessment of Logical Thinking (GALT). *Kasetsart Journal*, 12(2), 148-154.
- Robitaille, J.-M. (1997). *Étude exploratoire des conceptions de la circulation sanguine auprès d'élèves de l'ordre collégial*. (Université de Montréal, Montréal).
- Rocher, G. (1988). *Les cégeps: hier à aujourd'hui. Et demain?* Communication présentée à Actes du colloque tenu le 23 mars 1988 dans le cadre des 20 ans des cégeps, Joliette, QC.

- Schmidt, H.-J. (1996, April, 1996). *Students' understanding of molecular structure and properties of organic compounds*. Communication présentée à Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, St. Louis (MO).
- She, H.-C., & Liao, Y.-W. (2010). Bridging scientific reasoning and conceptual change through adaptative web-based learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(1), 91-119.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. Dans R. A. Duschl & R. J. Hamilton (dir.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (p. 147-176). Albany, NY: State University of New York Press.
- Taber, K. S. (1995). Development of student understanding: A case study of stability and lability in cognitive structure. *Research in Science & Technological Education*, 13(1), 89-99.
- Taber, K. S. (2000). Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Science Education*, 22(4), 399-417.
- Taber, K. S. (2001a). Building the structural concepts of chemistry: Some considerations from educational research. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 2(2), 123-158.
- Taber, K. S. (2001b). The mismatch between assumed prior knowledge and the learner's conceptions: A typology of learning impediments. *Educational Studies*, 27(2), 159-171.
- Taber, K. S., & Coll, R. K. (2002). Bonding. Dans J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi & D. F. Treagust (dir.), *Chemical education: Towards a research-based practice* (p. 213-234). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Taber, K. S., & García Franco, A. (2010). Learning processes in chemistry: Drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of matter. *Journal of the Learning Sciences*, 19, 99-142.
- Taber, K. S., & Tan, D. K.-C. (2011). The insidious nature of "hard-core" alternative conceptions: Implications for the constructivist research programme of patterns in high school students' and pre-service teachers' thinking about ionisation energy. *International Journal of Science Education*, 33(2), 259-297.
- Talanquer, V. (2006). Commonsense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811-816.
- Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of "structure of matter". *International Journal of Science Education*, 31(15), 2123-2136.
- Talanquer, V. (2010). Exploring dominant types of explanation built by general chemistry students. *International Journal of Science Education*, 32(18), 2393-2412.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplets". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Tan, D. K.-C., Goh, N. K., Chia, L. S., & Treagust, D. F. (2002). Development and application of a two-tier multiple choice diagnostic instrument to assess high school students' understanding of inorganic chemistry qualitative analysis. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(4), 283-301.
- Tardif, J. (1992). *Pour un enseignement stratégique : l'apport de la psychologie cognitive*. Montréal: Éditions Logiques.
- Tardif, J. (1997). La construction des connaissances 1. Les consensus. *Pédagogie collégiale*, 11(2), 14-19.

- Thouin, M. (2009). *Épistémologie, sciences et technologies, Notes de cours (DID 6009)*. Document inédit.
- Torkia-Lagacé, M. (1981). La pensée formelle chez les étudiants de collège 1: objectif ou réalité? Québec, QC: Cégep de Limoilou.
- Towns, M. H., Raker, J. R., Becker, N., Harle, M., & Stutcliffe, J. (2012). The biochemistry tetrahedron and the development of the taxonomy of biochemistry external representations (TOBER). *Chemistry Education Research and Practice*, 13(3), 296-306.
- Treagust, D. (en préparation). *Multiple representations in physical education*. The Netherlands: Springer.
- Treagust, D., & Tsui, C.-Y. (2013). *Multiple representations in biological education*. The Netherlands: Springer.
- Treagust, D. F. (1988). Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. *International Journal of Science Education*, 10(2), 159-169.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Mamiala, T. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353-1368.
- Treagust, D. F., & Duit, R. (2008). Conceptual change: A discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. *Cultural Studies of Science Education*, 3, 297-328.
- Tsaparlis, G. (1997). Atomic and molecular structure in chemical education: A critical analysis from various perspectives of science education. *Journal of Chemical Education*, 74(8), 922-925.
- Tsaparlis, G., & Papahotis, G. (2009). High-school students' conceptual difficulties and attempts at conceptual change: The case of basic quantum chemical concepts. *International Journal of Science Education*, 31(7), 895-930.
- Tsui, C.-Y., & Treagust, D. F. (2010). Evaluating secondary students' scientific reasoning in genetics using a two-tier diagnostic instrument. *International Journal of Science Education*, 32(8), 1073-1098.
- Tuckey, H., Selvaratnam, M., & Bradley, J. (1991). Identification and rectification of student difficulties concerning three-dimensional structures, rotation, and reflection. *Journal of Chemical Education*, 68(6), 460-464.
- Van der Maren, J.-M. (1996). *Méthodes de recherche pour l'éducation*. (2^e éd.). Bruxelles: De Boeck-Université.
- Vázquez-Abad, J., Harpin, I., Cormier, C., Tremblay, A., Garritz, A., & Treagust, D. F. (2013, April 6-9, 2013). *ConSOL: A computer-based diagnostic instrument based on the "two-tier multiple-choice test items"*. Communication présentée à 2013 NARST Annual International Conference, San Juan, Puerto Rico.
- Vermersch, P. (1994, éd. 2006). *L'entretien d'explicitation*. : ESF éditeur.
- Viennot, L. (1992). Raisonnement à plusieurs variables : tendances de la pensée commune. *Aster*, 14, 127-141.
- Voisard, B., & Cormier, C. (2013). *Chimie organique*. Anjou, QC: Les éditions CEC.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.

- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. Dans D. Gabel (dir.), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (p. 177-210). New York, NY: Simon & Schuster Macmillan.
- Wu, H.-K. (2003). Linking the microscopic view of chemistry to real-life experiences: Intertextuality in a high-school science classroom. *Science Education*, 87(6), 868-891.
- Wu, H.-K., Krajcik, J. S., & Soloway, E. (2001). Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 821-841.
- Zoller, U. (1990). Students' misunderstandings and misconceptions in college freshman chemistry (general and organic). *Journal of Research in Science Teaching*, 27(10), 1053-1065. doi: 10.1002/tea.3660271011
- Zumdahl, S. S., & Zumdahl, S. A. (2007). *Chimie générale, 3e édition*. Anjou: Les Éditions CEC.

Annexe A : Notions de chimie

Cette annexe a été rédigée pour deux fins : d'abord, il s'agit d'une partie de l'analyse didactique du contenu à l'étude, soit la définition des concepts, l'autre partie, soit l'étude des conceptions des étudiants, étant présentée dans la recension des écrits du chapitre 2. Ensuite, la présente annexe vise à permettre au lecteur de se familiariser avec le contenu en chimie qui sera rappelé dans le reste de la recherche.

Les énoncés les plus centraux sont mis en **caractères gras** et rappelés à l'annexe suivante (Annexe B : Énoncés propositionnels). Une carte conceptuelle est également présentée à l'Annexe C.

A.1 Analyse didactique du contenu

A.1.1 Mise en garde : le niveau de formulation de cette section

Les savoirs peuvent être exprimés à différents niveaux de formulation. Selon le niveau scolaire auquel sont destinés des savoirs à enseigner, par exemple, le niveau de formulation changera. Le signifié reste le même, seulement la forme, le signifiant, est adapté en fonction du niveau des étudiants ou du problème scientifique à résoudre (Astolfi et coll., 2008). Ainsi, une mise en garde s'impose pour la section de l'analyse didactique du contenu. Les concepts scientifiques signifiés ici sont exprimés au niveau de formulation congruent avec le niveau collégial en chimie. Ainsi, lorsqu'on parle par exemple de structure de la matière, des états de la matière ou de ses propriétés, le discours est situé à ce niveau de formulation. Il demeure que ces concepts pourraient être exprimés de façon différente, mais tout aussi juste, si le contexte était différent. Le niveau de formulation choisi pour expliquer les concepts qui suivent est celui de la chimie, et le degré d'approfondissement correspond au niveau collégial, soit le contexte dans lequel la présente recherche est menée.

A.1.2 Le comportement et la structure de la matière

La matière est tout ce qui a une masse. Les solides et les liquides, comme les gaz, ont une masse. Il s'agit là des trois états de la matière principaux¹⁷ (Brazhkin & Trachenko, 2012). Qu'elles soient solides, liquides ou gazeuses, les substances qui constituent la matière peuvent être pures ou faites de mélanges. Chaque substance a des propriétés qui lui sont propres. Par exemple, les gaz sont élastiques et ils flottent autour des gens et des choses, tandis que les solides ont une forme définie. Ainsi, tout le monde peut distinguer un solide d'un gaz. Un chimiste peut quant à lui expliquer à quoi tient une telle différence.

Toute la matière est constituée de particules invisibles, infiniment petites, en mouvement constant, qui s'attirent entre elles quand elles sont à une certaine distance, mais se repoussent lorsqu'on les compresse ensemble (Feynman, 1963, éd. 1995). Ce simple énoncé, le plus important de toutes les connaissances scientifiques selon le physicien américain Richard Feynman, est la base de l'explication d'une multitude de phénomènes et le fondement de tout raisonnement en chimie. On appelle cette notion en chimie la « nature corpusculaire de la matière », c'est-à-dire l'idée que la matière n'est pas continue, mais constituée de minuscules particules. Mais si ces particules sont en mouvement constant et qu'elles sont infiniment petites, comment peut-on expliquer l'état de la matière tel qu'on peut la voir avec les yeux?

Pour cela, il faut plonger au cœur même de la structure fine de la matière, et s'imaginer pouvoir voir ces particules et observer leur comportement. Par exemple, si les solides restent solides et ne vibrent pas jusqu'à se désintégrer alors que les particules qui les constituent sont en mouvement constant, c'est parce que ces dernières s'attirent : elles ont ainsi tendance à rester près les unes des autres. Mais qu'en est-il pour les particules de la matière liquide et gazeuse? Pour expliquer les différences entre ces états de la matière, on doit se dire que la force d'attraction entre les particules qui constituent un crayon (solide) est sûrement plus grande que celle entre les particules qui constituent l'eau d'une fontaine (liquide). C'est bien le cas, on le verra plus loin (à la section A.1.6.2 État de la matière). Cette attraction diffère selon la nature

¹⁷ Il existe en effet d'autres états de la matière (les fluides supercritiques ou les plasmas, par exemple). Toutefois, comme ces états ne sont pas enseignés en chimie au collégial et que la présente recherche ne s'y est pas attardée, les trois seuls états principaux seront considérés, même s'il s'agit d'une simplification.

des particules. L'état de la matière dépend de l'intensité des attractions que font les particules qui la constituent.

Si la nature des particules varie, elles ont une chose en commun : elles sont toutes constituées d'atomes. L'atome est la plus petite particule qui caractérise un élément chimique (IUPAC, 1997). Il existe 116 éléments chimiques dans l'univers, donc 116 possibilités d'atomes. *Seulement* 116 possibilités, ce qui n'explique pas la grande variété de la matière qui existe. Il suffit d'imaginer tous les médicaments, toutes les variétés de roches, tous les alliages métalliques, tous les plastiques, toutes les nuances de couleurs, tous les ingrédients de cuisine : il y a beaucoup, beaucoup plus que 116 types de matière.

C'est que les éléments chimiques ne se retrouvent généralement pas tels quels, mais sous forme de combinaisons. Plusieurs éléments combinés ensemble forment un composé. C'est la grande variété de composés possibles qui explique la variété de la matière. L'eau n'est pas un élément : c'est un composé. Le sucre et le sel aussi sont des composés. Ils sont constitués de différents éléments combinés chimiquement ensemble : l'eau est un composé d'hydrogène et d'oxygène; le sel, de sodium et de chlore; le sucre, d'hydrogène, d'oxygène et de carbone. **Les propriétés des composés sont complètement différentes des propriétés des éléments qui les constituent.** En effet, le carbone est un solide noir (la mine de crayon est faite de carbone), mais le sucre, un composé dont l'un des éléments est le carbone, n'en est pas noir pour autant! Les liaisons chimiques entre les éléments modifient leurs propriétés.

L'eau, le sucre et le sel sont des substances pures, même s'il s'agit de composés, par opposition à des mélanges. De l'eau salée est un exemple de mélange. Il est plus simple de considérer la matière en ne parlant d'abord que des substances pures. Il sera d'abord présenté comment sont constituées les substances pures, puis la distinction entre plusieurs significations d'un terme important sera illustrée, soit le terme « polarité », et cette section se terminera en utilisant ces modèles pour expliquer la nature macroscopique de la matière.

A.1.3 Substances pures : quatre catégories du domaine macroscopique

Les substances pures peuvent être classées dans l'une des quatre catégories du tableau qui suit¹⁸.

Tableau XXXI : Catégories de substances pures

Catégories de substances	Organisation sous-microscopique	Constituants de base de la substance	Liaisons chimiques dans les constituants de base
Composés moléculaires	Entités discrètes reliées par liaisons intermoléculaires.	Molécules	Liaisons covalentes
Composés ioniques	Réseau continu dont les particules sont reliées par liaisons ioniques.	Ions	Liaisons covalentes
Solides covalents	Réseau continu dont les particules sont reliées par liaisons covalentes.	Atomes	-
Métaux	Réseau continu dont les particules sont reliées par liaisons métalliques.	Atomes	-

Les propriétés des substances dans le domaine macroscopique découlent des caractéristiques des particules qui les constituent. Il est pour cette raison important de s'attarder à bien définir ces particules, nommées ici les constituants de base de la substance. Les constituants de base des substances pures ne logent pas tous à la même enseigne. Les deux premiers, soit les molécules et les ions, sont constitués du troisième, les atomes. En effet, dans les solides covalents et les métaux, il n'y a pas de structure intermédiaire : les substances sont directement formées d'atomes. Au contraire, les composés moléculaires et les composés ioniques sont composés de particules de taille et de complexité intermédiaires : plus complexe que l'atome, moins complexe que la substance complète. Les molécules et les ions sont donc composés d'atomes; de plus, s'il y a plus d'un atome dans une molécule ou un ion, ce qui est le cas dans la plupart des composés moléculaires et des composés ioniques, ces atomes sont liés entre eux par des liaisons covalentes. Les molécules et les ions sont des entités discrètes.

¹⁸ Les cas limites qui ne font pas partie de l'environnement proximal ont délibérément été mis de côté : les complexes organométalliques, les sels à l'état gazeux, la matière dégénérée des étoiles, etc. L'enseignement de ces notions devrait se faire après que les étudiants ont compris la distinction entre les quatre catégories de base.

Les liaisons covalentes se trouvent donc à deux niveaux d'organisation de la matière : pour retenir les atomes dans les structures intermédiaires que sont les molécules et les ions, et pour retenir les atomes dans les solides covalents.

Considérant sa prédominance conceptuelle au sein de la présente recherche, il est important de retenir qu'**une molécule est constituée de deux atomes ou plus, liés par des liaisons covalentes, pour former une unité discrète.**

Un ion est quant à lui une entité discrète sous-microscopique de matière formée d'un atome ou d'un regroupement d'atomes, mais contrairement aux molécules, il a une charge nette non nulle, positive ou négative. Lorsqu'il est constitué de plus d'un atome, un ion est qualifié de « polyatomique », et les liaisons entre ces atomes, comme mentionné précédemment, sont covalentes. Lorsque plusieurs ions sont assemblés, on a un composé ionique. **Un composé ionique est constitué d'ions, liés par des liaisons ioniques pour former un réseau continu.**

Il ne sera pas question dans cette recherche des solides covalents et des métaux, qui ne seront conséquemment pas détaillés davantage.

A.1.4 Quelques notions sur la liaison chimique

L'attraction entre les particules qui constituent la matière est de nature électrostatique, ce qui veut dire qu'elle s'effectue entre des charges électriques opposées : les charges positives attirent les charges négatives. Cela implique qu'il y a des charges dans les atomes.

En effet, les atomes sont eux-mêmes constitués de particules encore plus petites, soit les protons (qui possèdent une charge positive) et les électrons (qui possèdent une charge négative). Il existe aussi des particules neutres dans les atomes (les neutrons) qui n'influencent pas l'attraction entre les atomes, car ils ne sont pas électriquement chargés.

La liaison covalente peut se définir simplement comme une liaison issue de l'attraction entre les électrons et les protons de deux atomes distincts : le noyau positif d'un atome attire les électrons négatifs de l'autre atome, et réciproquement. On dit souvent, pour cette raison, qu'**une liaison covalente implique le partage d'électrons de valence des atomes liés.** La liaison est qualifiée de covalente, parce que ce sont les électrons de valence, ceux qui sont les plus éloignés du noyau de l'atome, qui peuvent être ainsi partagés. Ce ne sont pas tous les électrons de valence qui participent à des liaisons, par contre. **Les électrons liants sont les électrons de valence qui**

participent à la liaison covalente. Les électrons de valence qui ne participent pas à la liaison covalente sont quant à eux les électrons non liants.

Pour passer au niveau d'organisation supérieur des molécules, il faut savoir que **les molécules font aussi des liaisons entre elles**. Ce sont les liaisons intermoléculaires. Elles sont beaucoup plus faibles que les autres liaisons vues jusqu'à maintenant, parce qu'elles s'exercent entre des particules (les molécules) qui n'ont pas de charge formelle. **L'intensité des liaisons intermoléculaires dépend des charges partielles des molécules**. Les charges partielles constituent ce qu'on appelle la polarité des molécules, qui est présenté à la section suivante.

Avant de parler de polarité, il convient de discuter d'un type de liaisons intermoléculaires qui ne nécessite pas que les molécules aient une quelconque polarité pour exister : il s'agit des forces de dispersion de London. Toutes les molécules font entre elles des liaisons intermoléculaires, mais les molécules polaires font des liaisons intermoléculaires plus intenses que les molécules non polaires de taille similaire, qui ne font que des forces de dispersion de London entre elles. Ces forces existent grâce à la polarisabilité de la surface des molécules : à un moment précis, le nuage électronique d'une molécule peut être légèrement déplacé d'un côté de la molécule, laissant derrière lui un dipôle instantané. Ce dipôle instantané, même s'il est très faible, suffit pour attirer le dipôle instantané d'une autre molécule de la même substance qui subit elle aussi, de façon stochastique, un déplacement de son nuage électronique au même moment. Ces attractions entre dipôles instantanés sont fugaces, mais suffisent à expliquer les attractions que font entre elles les molécules non polaires, qui ne font pas d'autres types de liaisons intermoléculaires. Plus le nuage électronique d'une molécule est grand, plus les forces de dispersion de London qu'elle peut faire avec ses voisines sont intenses. En résumé, **l'intensité des forces de dispersion de London est plus faible que celle des autres liaisons intermoléculaires, et elle dépend de la polarisabilité (donc de la taille) du nuage électronique des molécules**.

Il existe un type particulier de liaisons intermoléculaires, appelé les liaisons hydrogène ou **ponts H, dont l'intensité est un peu plus grande que celle des autres liaisons intermoléculaires**. Pour cette raison, ces liaisons expliquent les propriétés un peu différentes des composés moléculaires qui en font. Des caractéristiques structurales bien précises sont nécessaires pour que des molécules forment des ponts H entre elles : **les molécules qui ont un**

atome d'hydrogène portant une charge positive partielle élevée font des liaisons intermoléculaires nommées les ponts H. Cette définition nécessite elle aussi de comprendre la polarité, dont voici immédiatement un aperçu.

A.1.5 La polarité : principe explicatif important, mais équivoque

Un facteur influence de façon importante l'intensité des liaisons intermoléculaires : c'est la polarité. Le terme « polarité » en chimie est particulièrement équivoque, puisqu'on peut parler de polarité pour qualifier trois concepts : les substances, les molécules et les liaisons. Les prochaines sections s'attarderont donc à lever le voile sur cette équivocité.

A.1.5.1 Substances polaires

Les substances polaires sont celles qui sont solubles dans les solvants polaires. Bien que cette définition soit tautologique, celle de l'Union internationale de chimie pure et appliquée n'est pas beaucoup plus claire : dans son lexique, elle qualifie de « plutôt mal défini » (« *rather ill-defined* ») le mot « polarité » lorsqu'appliqué aux solvants (IUPAC, 1997). Le terme « polaire » est surtout particulièrement équivoque : on parle de polarité des substances comme les solvants, de polarité des molécules et de polarité des liaisons, souvent sans préciser dans quel domaine du savoir est située l'utilisation du terme. Même des chimistes d'expérience peuvent parfois confondre la polarité d'un solvant avec sa capacité à solubiliser un composé polaire : d'autres facteurs sont en effet à considérer lors de la mise en solution, mais certains chimistes ont tendance à croire, par exemple, que l'éthanol est un solvant très polaire, alors qu'en fait, la polarité de la molécule d'éthanol est assez faible (son moment dipolaire est de 1,69 D, comparé par exemple à celle de l'acétone, 2,88 D ou celle de l'eau, 1,85 D) (Handbook of Chemistry and Physics [HCP], 2013).

La polarité d'une substance est surtout invoquée lorsqu'on veut choisir un solvant possédant une polarité semblable pour la solubiliser. L'aphorisme « qui se ressemble, s'assemble » est souvent utilisé par les enseignants pour expliquer que les substances ayant des polarités semblables sont solubles les unes dans les autres. Cela implique bien entendu que les substances non polaires sont solubles dans les solvants non polaires. Une substance comme

l'acétone, très polaire, dissout bien l'acide maléique, également une substance polaire. L'hexane quant à lui, substance non polaire, dissout très bien le cholestérol, qui est peu polaire.

Le caractère polaire d'un solvant ne peut pas s'expliquer par le domaine macroscopique. On observe expérimentalement que certains liquides se mélangent ensemble, mais c'est à partir des structures des molécules formant ces liquides qu'on peut expliquer ce qui fait que l'un est polaire et l'autre, non polaire. Les termes polaire et non polaire réfèrent d'ailleurs directement à une caractéristique des molécules, qui sera discutée immédiatement.

A.1.5.2 Molécules polaires

Les substances sont polaires si les molécules qui les constituent sont polaires. La polarité est donc l'une des rares propriétés qui sont directement transposées du domaine sous-microscopique au domaine macroscopique. Toutefois, on n'entend pas la même chose par « polarité » quand il s'agit d'une molécule et quand il s'agit d'une substance. **Une molécule est polaire si les électrons des atomes qui la constituent ne sont pas répartis également dans tout le volume de la molécule.** Lorsque les électrons sont plutôt localisés d'un côté, ils entraînent la présence d'un pôle négatif de ce côté de la molécule. Ce faisant, un autre endroit de la molécule se retrouve avec un déficit d'électrons, ce qui génère un pôle positif à cet endroit. Il y a donc une séparation de charges entraînant la présence d'un moment dipolaire électrique.

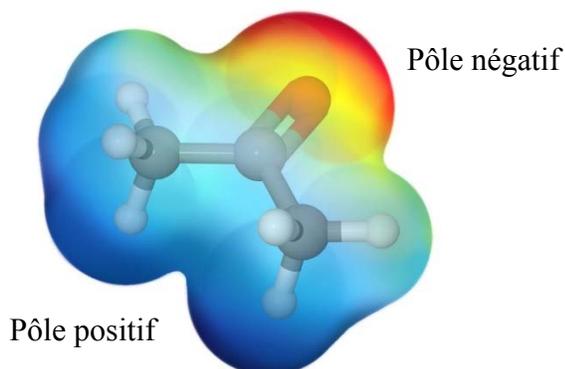


Figure 23 : Représentation de la surface électrostatique de l'acétone, une molécule polaire

A.1.5.3 Liaisons polaires

Les molécules sont polaires si elles sont constituées de façon à ce qu'il y ait possibilité d'une séparation de charges. Or, les électrons ne se localisent pas dans un coin de la molécule sans raison : ils se polarisent près des atomes qui les attirent le plus fortement. **La propension d'un atome à attirer fortement les électrons dans une molécule et à causer potentiellement un pôle négatif à cet endroit s'appelle l'électronégativité.** L'électronégativité est une valeur déterminée expérimentalement et s'exprime sans unité : elle a été établie, pour chaque élément, en observant la polarité des liaisons qu'il fait avec d'autres éléments dans un composé. Ainsi, si un élément porte toujours le pôle négatif dans toutes les liaisons qu'il fait avec tous les autres éléments, sa valeur d'électronégativité est déterminée comme étant la plus grande. C'est le cas du fluor, qui a la plus grande valeur d'électronégativité, à 3,98, la mesure révisée basée sur l'échelle originale de Pauling (HCP, 2013). À l'opposé, l'élément qui porte toujours le pôle positif dans toute liaison qu'il fait avec un élément différent est le francium. On lui a attribué une valeur d'électronégativité de 0,7.

Les atomes qui ont une électronégativité élevée sont ceux des éléments non métalliques, en particulier ceux de petite masse atomique, des familles 15, 16 et 17 du tableau périodique. Dans l'exemple de la figure précédente, le pôle négatif de la molécule d'acétone est causé par la présence d'un atome très électronégatif, l'oxygène. L'atome d'oxygène a une masse atomique faible et est dans la famille 16 du tableau périodique; son électronégativité est élevée, à 3,44.

Une liaison polaire est une liaison entre deux atomes ayant une différence significative d'électronégativité. Il est généralement accepté qu'une liaison est polaire si la différence d'électronégativité entre les atomes liés est supérieure ou égale à 0,5. Lorsque la différence est plus faible, la liaison est considérée comme non polaire.

Le moment dipolaire de la liaison est un vecteur : en effet, il a une direction, un sens et une magnitude. Sa direction est l'axe entre les deux atomes liés. Son sens pointe vers l'atome le plus électronégatif¹⁹. Sa magnitude est proportionnelle à la différence d'électronégativité entre

¹⁹ Une autre convention fait plutôt pointer le vecteur vers l'atome le moins électronégatif. Plusieurs manuels utilisent la convention présentée ici, mais certains autres utilisent l'autre. Il peut être pertinent, lorsqu'on enseigne ce contenu, de vérifier dans le manuel qu'utilisent ses étudiants quelle convention est utilisée pour éviter de les confondre.

les atomes. Comme illustré sur les molécules de la figure 24, le vecteur de moment dipolaire est représenté par une flèche barrée, pointant vers l'atome le plus électronégatif. Dans la portion de gauche, la différence d'électronégativité est faible et les liaisons sont considérées comme non polaires. Dans la portion de droite, la différence d'électronégativité est grande, les liaisons sont donc polaires.

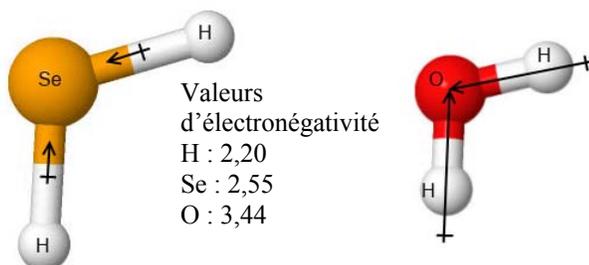


Figure 24 : Vecteurs de polarité des liaisons des molécules de sélénure d'hydrogène (H_2Se) et d'oxyde d'hydrogène (H_2O).

A.1.5.4 Prédiction de la géométrie moléculaire : la RPEV

Les molécules sont de très petits objets, mais même si elles sont petites, **les molécules ont une forme tridimensionnelle**. Cette forme est la géométrie moléculaire. C'est un attribut des molécules qui s'observe expérimentalement et se prédit théoriquement. Elle concerne l'orientation des atomes les uns par rapport aux autres et l'extension spatiale des molécules (IUPAC, 1997). **La théorie de la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV) est utilisée par les chimistes pour prédire grossièrement la géométrie moléculaire**. Même si elle a été surpassée par des théories dont le pouvoir prédictif est meilleur, la RPEV est néanmoins toujours très utilisée parce qu'elle est simple et parcimonieuse. Les étudiants collégiaux québécois étudient et utilisent la RPEV pour prédire la forme des molécules dans leurs cours de chimie.

Cette théorie stipule que les paires d'électrons, étant chargées négativement, se repoussent entre elles. Ainsi, **les paires d'électrons se positionnent à un certain angle dans la molécule, afin d'atteindre une position où la répulsion entre elles est minimale**. Cet angle varie selon le nombre de paires d'électrons de valence entourant un même atome central. Par exemple, lorsque deux paires d'électrons de valence entourent un atome, l'angle qui permet la

plus grande distance entre les deux paires est 180° : les deux paires d'électrons sont alors diamétralement opposées. Trois paires d'électrons se repoussent à un angle de 120° , quatre paires, à un angle de $109,5^\circ$, et ainsi de suite. La forme qui résulte de cette répulsion entre paires d'électrons est la géométrie de répulsion.

Les paires d'électrons dans une molécule ne sont toutefois pas toutes des paires d'électrons partagés dans une liaison. En effet, certaines paires d'électrons ne sont pas partagées, elles appartiennent en propre à l'un des atomes de la molécule et s'appellent des paires d'électrons libres. La géométrie de répulsion n'est donc pas directement la géométrie moléculaire : la géométrie moléculaire concerne l'orientation des atomes entre eux. Elle s'appuie donc sur la géométrie de répulsion, mais ne regarde que la position mutuelle des atomes, sans considération pour les paires d'électrons libres.

Une mise en garde s'impose à propos du nom de la théorie, soit « RPEV ». Le « P » signifie « paires », mais ce terme peut porter à confusion étant donné que les « paires » ne sont pas toujours constituées de deux électrons : dans les liaisons multiples, où deux ou trois paires d'électrons sont partagées, on considère la liaison comme une « paire », même si elle est constituée de quatre ou six électrons. En effet, la géométrie de répulsion est la même, que la « paire » soit constituée de deux électrons ou de quatre ou six faisant partie de la même liaison. C'est pourquoi plusieurs auteurs utilisent plutôt l'expression « domaines d'électrons », comme dans la figure qui suit, adaptée de Voisard et Cormier (2013).

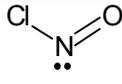
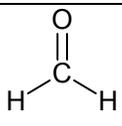
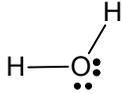
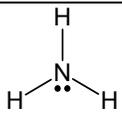
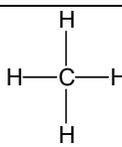
Nombre de domaines d'électrons	Géométrie de répulsion	Domaines d'électrons liants	Géométrie moléculaire	Exemple
2	linéaire	2	linéaire	$O=C=O$
3	trigonal plan	2	angulaire	
		3	triangulaire plane	
4	tétraédrique	2	angulaire	
		3	pyramidale à base triangulaire	
		4	tétraédrique	

Figure 25 : Géométries moléculaires pour un nombre de domaines électroniques entre deux et quatre.

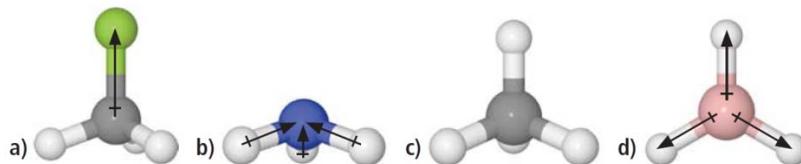
Cette figure illustre les géométries de répulsion et moléculaires autour des atomes entourés de deux à quatre domaines d'électrons. La géométrie des molécules ayant plusieurs atomes entourés de domaines d'électrons doit être prédite en considérant successivement la géométrie moléculaire autour de chacun de ces atomes, qu'on nomme des atomes centraux.

A.1.5.5 Prédiction de la polarité d'une molécule : vecteurs de polarité et addition vectorielle

Il est possible de prédire la polarité d'une molécule en se basant sur sa structure. Des logiciels de chimie computationnelle font ce genre de calculs et produisent une carte de potentiel électrostatique comme celle de la figure 23 (à la page viii), représentant une molécule d'acétone. Mais il est aussi possible de prédire la polarité sans utiliser de logiciel, simplement en observant la structure de la molécule. Cette habileté, qui est enseignée au collégial dès le premier cours obligatoire de chimie du programme de Sciences de la nature, est particulièrement importante pour l'étude de la chimie, car la polarité des substances peut en retour expliquer en partie leur

réactivité. Les étudiants qui prédisent correctement la polarité des molécules peuvent appuyer des raisonnements plus avancés en chimie sur de telles prédictions.

Afin de prédire la polarité d'une molécule, on doit considérer deux informations : la polarité des liaisons et la géométrie de la molécule. Si les liaisons de la molécule sont toutes non polaires, la molécule est non polaire : en effet, il n'y a aucune séparation de charges et le moment dipolaire moléculaire est nul. Une molécule dont une ou plusieurs liaisons sont polaires peut être polaire ou non polaire, selon sa forme. Si tous les vecteurs de moment dipolaire des liaisons s'annulent géométriquement parce qu'ils sont placés de telle façon que la résultante de l'addition vectorielle est nulle, alors la molécule est non polaire. Toutefois, lorsque certains vecteurs de polarité de liaisons ne sont pas annulés et qu'il existe donc une résultante non nulle à l'addition vectorielle, alors **la molécule possède un dipôle et est polaire**. La figure ci-dessous illustre ces possibilités.



© Les Éditions CEC. Reproduit avec l'autorisation de l'éditeur.

Figure 26 : Deux molécules polaires et deux molécules non polaires

Les molécules a) et b) sont polaires parce que leurs vecteurs de moment dipolaire ne s'annulent pas entre eux; la résultante de polarité est non nulle. **Les molécules qui ne possèdent pas de dipôle sont non polaires**; c'est le cas des molécules c) et d). La molécule c) est non polaire parce qu'aucune de ses liaisons n'est polaire (aucun vecteur de moment dipolaire). La molécule d) est non polaire parce que tous ses vecteurs de moment dipolaire s'annulent entre eux, avec une résultante nulle.

Pour prédire la polarité d'une grosse molécule, un chimiste doit juger de l'importance des portions polaires et non polaires de la molécule. Si une molécule comporte de très nombreuses liaisons non polaires et une seule liaison polaire, la séparation de charge due à cette liaison polaire ne sera pas suffisante pour rendre la molécule globalement polaire. Le raisonnement nécessaire pour juger de la polarité de telles molécules étant plus complexe qu'une simple addition vectorielle, l'expérience permet alors de trancher la question.



A.1.5.6 Note à propos de la polarité et des composés ioniques

Les substances polaires solubilisent les composés moléculaires polaires, et elles peuvent aussi solubiliser les composés ioniques, qui sont constitués de particules sous-microscopiques discrètes chargées. On peut effectivement dire que les ions sont encore plus que polaires. C'est pourquoi ils peuvent se solubiliser dans les substances polaires.

A.1.6 Nature sous-microscopique pour expliquer les phénomènes macroscopiques

Les phénomènes macroscopiques auxquels s'intéresse la présente recherche sont la mise en solution, l'état de la matière, le changement de phase et la structure des solides. Ces phénomènes sont macroscopiques au sens où on peut en faire l'observation avec ses sens : on voit le sucre se dissoudre dans l'eau, par exemple. L'éclairage particulier de la chimie sur ces phénomènes est qu'elle fournit des modèles explicatifs et même prédictifs pour ces observations. Ces modèles ont en commun d'invoquer les modèles du domaine sous-microscopique pour expliquer ce qui est observable à l'échelle macroscopique. Voici comment les concepts expliqués jusqu'à maintenant permettent d'expliquer ces phénomènes.

A.1.6.1 Mise en solution

La mise en solution de composés moléculaires implique le bris et la formation de liaisons intermoléculaires et parfois le bris de liaisons covalentes, dans le cas des composés moléculaires qui s'ionisent dans un solvant. Voici une explication de ces deux volets de la mise en solution.

La mise en solution d'un composé moléculaire dans un solvant nécessite que les particules des deux composés s'attirent les unes les autres, fassent des liaisons entre elles. Si les particules ne font pas de liaisons entre elles, les substances ne se mélangent pas, elles sont insolubles l'une dans l'autre. Un composé moléculaire est soluble dans un solvant s'il fait des liaisons intermoléculaires avec les molécules du solvant. Ces liaisons intermoléculaires entre molécules différentes sont les mêmes que celles qui existent dans une substance pure composée de molécules identiques.

Les liaisons intermoléculaires permettent aux substances polaires d'être solubles dans les substances polaires, et aussi aux substances non polaires d'être solubles dans les substances non polaires. L'huile (non polaire) et l'essence (non polaire) sont ainsi solubles l'une dans l'autre, de la même façon que l'eau (polaire) est soluble dans l'acétone (polaire).

Comme les ponts H (voir à la section A.1.4) sont plus intenses que les autres liaisons intermoléculaires, une substance dont les molécules font des ponts H avec les molécules d'un solvant est plus soluble dans ce solvant qu'une substance n'en faisant pas. Par exemple, l'eau est un solvant qui fait des ponts H (on dit que c'est un donneur de ponts H). L'eau solubilise l'acide acétique (contenu dans le vinaigre) parce que les molécules de l'une font des ponts H avec les molécules de l'autre.

On utilise souvent l'aphorisme « qui se ressemble, s'assemble » pour parler de la solubilité : les composés polaires sont solubles dans les solvants polaires; les composés non polaires, dans les solvants non polaires; les composés qui font des ponts H, dans les solvants qui font des ponts H. Ces solubilités s'expliquent par les liaisons intermoléculaires.

La polarité et les ponts H n'expliquent par contre pas tous les aspects de la solubilité. Certaines molécules sont très solubles dans les solvants polaires, mais pas uniquement parce qu'elles sont polaires. Certaines mises en solution vont jusqu'à passer par le bris des liaisons covalentes des molécules de soluté. C'est le cas des acides forts par exemple : une molécule comme le chlorure d'hydrogène, assez moyennement polaire au demeurant, est très soluble dans l'eau parce qu'elle s'ionise, c'est-à-dire qu'elle se brise en deux ions, lorsqu'elle entre en contact avec l'eau. Cette propriété de l'eau d'ioniser certaines molécules est très particulière, et possible à cause de la petite taille de la molécule d'eau et du fait qu'elle est un donneur de ponts H. Les ions issus du bris de la molécule s'ionisant se retrouvent entourés de molécules d'eau, et les liaisons « intermoléculaires » qui existent alors sont de type ion-dipôle, des liaisons plus fortes encore que les ponts H. Même si elles demeurent moins fortes que la liaison covalente entre les atomes du chlorure d'hydrogène (le H et le Cl), elles sont plus nombreuses, permettant au processus d'ionisation de cette molécule d'être favorable : beaucoup d'énergie est libérée par les nombreuses liaisons ion-dipôle formées.

Les acides faibles, par contre, ne s'ionisent que très peu dans l'eau. S'ils y sont très solubles, c'est parce qu'ils forment des ponts H avec l'eau, comme c'était le cas de l'exemple de l'acide acétique (un acide faible).

Il ne faut pas confondre l'ionisation des composés moléculaires dans l'eau avec la dissociation ionique des composés ioniques dans l'eau. Dans les composés ioniques, les ions existent déjà avant que la substance entre dans l'eau, ils ne sont que dissociés lorsqu'ils passent en solution; dans les composés moléculaires, toutefois, il n'y a pas d'ions à priori (ils sont formés lors du processus de mise en solution).

A.1.6.2 État de la matière

Comme on l'a vu, il existe des liaisons intermoléculaires entre les molécules d'une solution, mais aussi entre les molécules d'une substance pure. Dans certaines substances, les liaisons intermoléculaires sont fortes et les molécules ont tendance à demeurer près les unes des autres, retenues par ces liaisons. Dans d'autres substances, par contre, les liaisons intermoléculaires sont faibles. Les molécules ne sont pas bien retenues ensemble et ont tendance à s'échapper de tous les côtés.

On peut voir ces phénomènes à l'échelle macroscopique : une substance composée de molécules qui font des liaisons intermoléculaires fortes est solide à température de la pièce, comme le sucre. Au contraire, quand on a affaire à un gaz, par exemple l'oxygène, c'est parce que les molécules de la substance ne s'attirent pas beaucoup entre elles. **L'état de la matière d'une substance dépend de l'intensité des liaisons intermoléculaires que font ses molécules.** Comparer le modèle de la molécule de sucre et celui de la molécule d'oxygène permet de comprendre pourquoi l'une fait des liaisons intermoléculaires plus fortes que l'autre : les molécules de sucre sont polaires, de grande taille, et elles font des liaisons hydrogène entre elles. Au contraire, les molécules d'oxygène sont non polaires, de très petite taille et elles ne font pas de liaisons hydrogène. Le modèle explique donc bien les observations.

Dans une autre des catégories de substances présentées précédemment, les liaisons sont encore plus fortes : les liaisons ioniques, qui retiennent les ions dans les composés ioniques, sont effectivement beaucoup plus fortes que les liaisons intermoléculaires. Suivant cette logique, les composés ioniques devraient avoir tendance à être solides. C'est bien le cas : les composés

ioniques, qui regroupent tous les sels (sel de table, sel d’Epsom, crème de tartre, etc.), sont tous solides à température de la pièce.

Un des principaux raisonnements qu’appliquent les chimistes pour prédire l’état – solide, liquide ou gazeux – de la matière consiste à s’appuyer sur les liaisons intermoléculaires que font les molécules entre elles. C’est aussi de cette façon qu’on demande aux étudiants collégiaux de chimie de procéder. Comme expliqué précédemment, les liaisons intermoléculaires sont causées par les propriétés des molécules, en particulier par leur polarité : des molécules polaires s’attirent plus fortement entre elles que des molécules non polaires de même taille. La polarité des molécules elle-même est causée par la géométrie des molécules et la polarité de leurs liaisons. Enfin, la polarité des liaisons est causée par la séparation de charge des électrons partagés dans les liaisons covalentes, et se prédit en comparant les électronégativités des éléments liés. À la base du raisonnement se trouve la structure des molécules, ce qui comprend leur composition élémentaire (de quels éléments cette molécule est-elle composée?), la connectivité des atomes (quels atomes sont liés entre eux dans cette molécule?) et la géométrie moléculaire (quelle est la forme tridimensionnelle de cette molécule?). L’ordre du raisonnement est présenté à la figure 27.

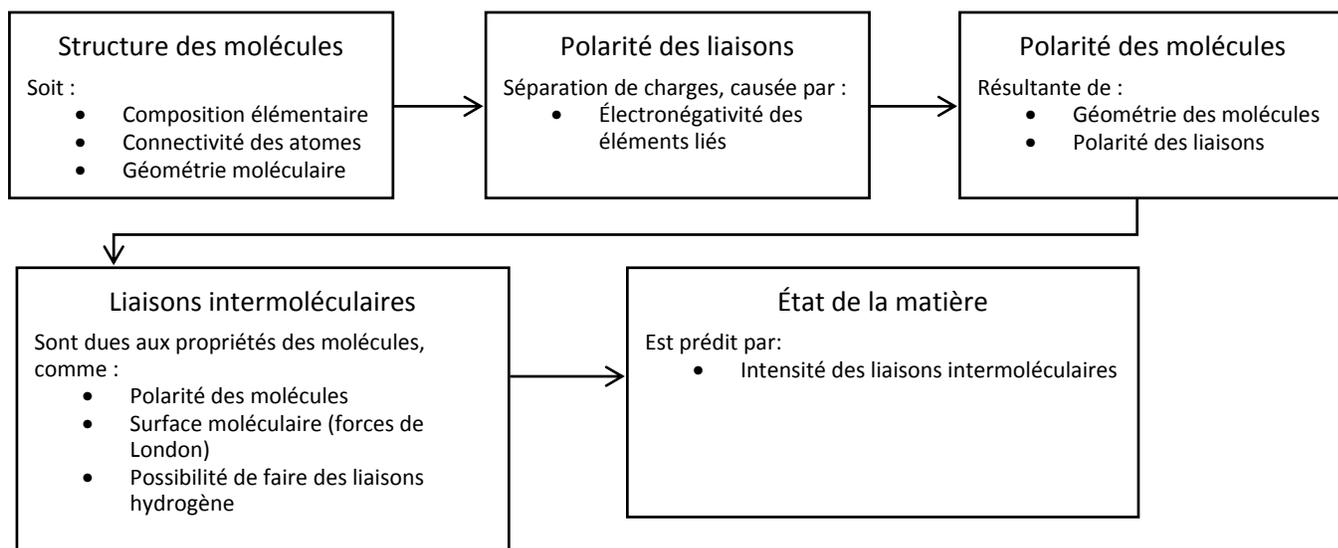


Figure 27 : Schéma du raisonnement pour prédire l’état – solide, liquide ou gazeux – d’une substance aux conditions ambiantes.

Voici un exemple du raisonnement complet illustré à la figure 27 : pour savoir si le glucose est solide ou liquide à température de la pièce et pression ambiante, on doit connaître la

structure des molécules de glucose, soit la composition en éléments, la connectivité des atomes et la géométrie de la molécule. On doit ensuite établir quelles liaisons sont polaires. Puis, on doit mentalement évaluer si la molécule elle-même est polaire, en jugeant de la magnitude, de la direction et du sens des vecteurs de polarité causés par les liaisons polaires. En sachant que plus une molécule est polaire, plus les liaisons intermoléculaires qu'elle fait avec ses voisines dans la substance pure sont fortes, on peut prédire que le glucose est un solide aux conditions ambiantes, parce que ses liaisons nombreuses entre atomes de carbone et d'oxygène sont polaires et la géométrie de la molécule fait que les polarités des liaisons s'additionnent entre elles jusqu'à en faire une molécule polaire. De plus, les molécules de glucose font des liaisons hydrogène entre elles, à cause d'une particularité de leur connectivité : en effet, les atomes d'oxygène du glucose sont liés à des atomes d'hydrogène, qui peuvent être presque partagés entre deux molécules, causant un pont particulièrement solide entre elles.

A.1.6.3 Changement de phase

Les changements de phase sont les transformations de la matière lorsqu'elle change d'état (passage entre solide, liquide et gazeux). Par exemple, lorsqu'un solide passe à l'état liquide, c'est le changement de phase qu'on l'appelle la fusion. Chaque changement de phase a sa propre appellation (ébullition, condensation, liquéfaction, etc.). Les changements de phase sont des transformations qui n'affectent pas la nature des substances, ce ne sont donc pas des réactions chimiques : cela signifie que de l'eau qui bout reste de l'eau, elle ne change pas de nature.

La liaison covalente est une liaison forte entre des atomes; ainsi, **les liaisons covalentes ne se brisent pas lors du changement de phase des composés moléculaires et ioniques** : ce sont plutôt les liaisons intermoléculaires ou les liaisons ioniques qui se brisent.

Ainsi, si on chauffe de l'eau jusqu'à 100 °C, elle se met à bouillir et elle s'évapore. De liquide, elle passe en phase gazeuse, c'est l'ébullition. Ce changement de phase se modélise, au domaine sous-microscopique, par les liaisons intermoléculaires qui se brisent sous la vibration intense des molécules d'eau s'agitant de plus en plus fort à mesure qu'elles absorbent l'énergie. Les liaisons intermoléculaires ne suffisent plus à retenir les molécules qui possèdent le plus

d'énergie. C'est pourquoi ces molécules peuvent s'éloigner des autres. Les molécules restent intactes, mais elles ne sont plus « collées » les unes aux autres.

De la même façon, quand on fait refroidir un liquide, que ce soit de l'eau ou toute autre substance pure (comme le benzène, l'hexane, l'acétone), les molécules perdent de l'énergie, elles s'agitent de moins en moins. Vient un moment où elles s'agitent suffisamment peu pour que les liaisons intermoléculaires s'établissent entre elles et les regroupent dans une structure ayant une forme définie : c'est la solidification. Cette solidification se produit à une température propre à chaque substance. L'eau se solidifie (ou gèle) à 0 °C. Mais les autres liquides ne gèlent pas à cette température : l'acétone, par exemple, ne se solidifie qu'à -95 °C, une température bien plus basse que celle des congélateurs domestiques (HCP, 2013)!

Pour ce qui est des composés ioniques, pour les faire passer à l'état liquide, il faut les chauffer à très haute température. À titre d'exemple, le sel de table a une température de fusion de 800 °C alors que celle du sucre, un composé moléculaire, est de 182 °C seulement (HCP, 2013). On peut facilement faire fondre du sucre sur la cuisinière, mais impossible d'y faire fondre du sel, car les cuisinières n'atteignent pas cette température. Les solides covalents, comme le verre, fondent aussi à très haute température, étant donné que ce sont des liaisons covalentes qu'il faut briser pour les amener à l'état liquide.

A.1.6.4 Structure des solides

Une dernière propriété de la matière découle elle aussi des concepts du domaine sous-microscopique : c'est la structure des solides. **La forme des molécules et leurs liaisons intermoléculaires donnent la structure aux solides moléculaires.** La forme particulière des flocons de neige, par exemple, qui affichent une symétrie à six branches, s'explique par l'angle que font les molécules d'eau entre elles, lorsqu'elles sont fixées en position par les ponts H. Cet angle lui-même est issu de la forme de la molécule d'eau.

Les autres solides ont une structure qui est due à l'arrangement de leurs constituantes sous-microscopiques. Les composés ioniques (les sels) forment des solides dont la structure cristalline est très régulière; le sel de table formant des cubes parfaits, explicables par l'organisation des ions sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-) dans le domaine sous-microscopique.

A.1.7 Nature corpusculaire, polarité et état de la matière : un résumé

La nature corpusculaire de la matière permet d'expliquer plusieurs phénomènes macroscopiques, notamment la mise en solution et les changements de phase. Les substances qu'on observe au domaine macroscopique sont constituées d'atomes, qui se regroupent pour faire des molécules, des ions, des composés moléculaires et ioniques, des solides covalents et des métaux. Il existe différents types de liaisons entre ces regroupements, mais ce sont toujours en fin de compte des attractions électrostatiques.

La distinction entre molécule et composé ionique, entre liaison covalente et liaison ionique et enfin entre liaison covalente et liaison intermoléculaire peut être difficile à comprendre parce que ces concepts sont complexes, peu intuitifs et souvent interreliés.

En particulier, le raisonnement qui permet de prédire l'état de la matière est complexe et nécessite de mettre en relation plusieurs concepts : structure des molécules, polarité des liaisons, polarité des molécules, liaisons intermoléculaires et les concepts qui leur sont sous-ordonnés. Le concept central à ce raisonnement est celui de polarité, et la difficulté est augmentée par le fait qu'il peut sembler équivoque aux étudiants lorsqu'on parle de « polarité des liaisons » et de « polarité des molécules », deux concepts distincts, bien qu'interreliés (l'un étant une base de raisonnement de l'autre).

Annexe B : Énoncés propositionnels

Dans la suite de l'analyse didactique des concepts présentés à l'annexe précédente, des énoncés propositionnels ont été rédigés, visant à détailler sous forme de points brefs et successifs les contenus qui sont visés par la présente recherche. Voici cette liste d'énoncés propositionnels. Il est à noter qu'ils sont présentés dans le même ordre qu'à l'annexe précédente (Annexe A), où ils étaient présentés en **caractères gras**.

Notez que les numéros des énoncés propositionnels (EP01 à EP31) sont repris à l'Annexe F, où ils sont mis en regard des conceptions alternatives relevées lors de la présente étude.

Énoncés propositionnels	Sujets centraux
EP01 La matière est tout ce qui a une masse.	Matière
EP02 Toute la matière est constituée de particules invisibles, infiniment petites, en mouvement constant, qui s'attirent entre elles quand elles sont à une certaine distance, mais se repoussent lorsqu'on les compresse ensemble.	Nature corpusculaire de la matière
EP03 Les propriétés des composés sont complètement différentes des propriétés des éléments qui les constituent.	Nature corpusculaire de la matière
EP04 Les propriétés des substances dans le domaine macroscopique découlent des caractéristiques des particules qui les constituent.	Nature corpusculaire de la matière
EP05 Une molécule est constituée de deux atomes ou plus, liés par des liaisons covalentes pour former une unité discrète.	Notion de molécule
EP06 Un composé ionique est constitué d'ions, liés par des liaisons ioniques pour former un réseau continu.	Notion de [non] molécule
EP07 Une liaison covalente implique le partage d'électrons de valence des atomes liés.	Liaisons chimiques
EP08 Les électrons liants sont les électrons de valence qui participent à la liaison covalente. Les électrons de valence qui ne participent pas à la liaison covalente sont les électrons non liants.	Liaisons chimiques
EP09 Un paquet d'électrons peut être constitué soit d'une, deux ou trois paires d'électrons liants ou d'un doublet libre (deux électrons non liants).	Liaisons chimiques
EP10 Les molécules font des liaisons entre elles.	Liaisons chimiques
EP11 L'intensité des liaisons intermoléculaires est plus grande entre des molécules polaires qu'entre des molécules non polaires.	Liaisons chimiques
EP12 L'intensité des ponts H est plus grande que celle des autres liaisons intermoléculaires.	Liaisons chimiques
EP13 L'intensité des forces de dispersion de London est plus faible que celle des autres liaisons intermoléculaires, et elle dépend de la polarisabilité (donc de la taille) du nuage électronique des molécules.	Liaisons chimiques
EP14 Les molécules qui ont un atome d'hydrogène portant une charge positive partielle élevée font des liaisons intermoléculaires nommées les ponts H.	Liaisons chimiques

	Énoncés propositionnels	Sujets centraux
EP15	Les substances polaires sont celles qui sont solubles dans les solvants polaires.	Solubilité et mise en solution
EP16	Plus une molécule peut faire de ponts H avec les molécules d'un solvant, plus elle est soluble dans ce solvant.	Solubilité et mise en solution
EP17	Les substances sont polaires si les molécules qui les constituent sont polaires.	Polarité
EP18	Les liaisons polaires induisent des moments dipolaires dans la molécule.	Polarité
EP19	Une molécule est polaire si les électrons des atomes qui la constituent ne sont pas répartis également dans tout le volume de la molécule.	Polarité
EP20	La propension d'un atome à attirer fortement les électrons dans une molécule et à causer potentiellement un pôle négatif à cet endroit s'appelle l'électronégativité.	Polarité
EP21	Une liaison polaire est une liaison entre deux atomes ayant une différence significative d'électronégativité.	Polarité
EP22	Les molécules ont une forme tridimensionnelle qu'on nomme la géométrie moléculaire.	Forme des molécules
EP23	La théorie de la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV) sert à prédire la géométrie moléculaire.	Forme des molécules
EP24	La RPEV s'appuie sur l'observation que les paires d'électrons se positionnent à un certain angle dans la molécule, afin d'atteindre une position où la répulsion entre elles est minimale.	Forme des molécules
EP25	Afin de prédire la polarité d'une molécule, on doit considérer deux informations : la polarité des liaisons et la géométrie de la molécule.	Polarité
EP26	Une molécule qui possède un dipôle est polaire, une molécule qui n'en possède pas est non polaire.	Polarité
EP27	La polarité des molécules explique une partie de la solubilité des composés moléculaires.	Solubilité et mise en solution
EP28	La mise en solution de composés moléculaires implique le bris et la formation de liaisons intermoléculaires et parfois le bris de liaisons covalentes, dans le cas des composés moléculaires qui s'ionisent dans un solvant.	Solubilité et mise en solution
EP29	L'état de la matière d'une substance dépend de l'intensité des liaisons intermoléculaires que font ses molécules.	État de la matière
EP30	Les liaisons covalentes ne se brisent pas lors du changement de phase des composés moléculaires et ioniques.	État de la matière
EP31	La forme des molécules et leurs liaisons intermoléculaires donnent la structure aux solides moléculaires.	État de la matière

Annexe D : Principales conceptions répertoriées dans les écrits scientifiques

Concept	Conception alternative	Source
Notion de molécule	Les composés comme le chlorure de sodium, un composé ionique, existent sous forme de molécules.	Butts et Smith (1987); Coll et Taylor (2001); Othman, Treagust et Chandrasegaran (2008)
Nature corpusculaire de la matière	Les particules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	Ben-Zvi et coll. (1986); Johnson (1998); Mulford et Robinson (2002); Othman et coll. (2008)
	Les molécules prennent de l'expansion lorsqu'elles sont chauffées.	Ayas, Özmen et Çalik (2010); Griffiths et Preston (1992); Lee, Eichinger, Anderson, Berkheimer et Blakeslee (1993)
Liaison chimique	La liaison hydrogène est la liaison chimique la plus forte.	Nicoll (2001)
	Ce qui retient les atomes ensemble est autre chose que des liaisons chimiques.	Griffiths et Preston (1992)
	La liaison chimique est constituée de deux électrons qui forment une tige entre les atomes.	Butts et Smith (1987)
Polarité des liaisons	Les liaisons sont polaires quand le partage des électrons est égal entre les deux atomes.	Birk et Kurtz (1999); Nicoll (2001); Peterson, Treagust et Garnett (1989)
	(1) la polarité d'une liaison est due au nombre d'électrons de valence de chaque atome lié; (2) la polarité d'une liaison est due à la charge ionique des atomes liés; (3) les électrons non liants influencent la position des électrons partagés et déterminent la polarité de la liaison; et (4) l'atome le plus volumineux exerce un plus grand contrôle sur les électrons partagés.	Birk et Kurtz (1999)
Forme des molécules	La forme d'une molécule est uniquement due au nombre de paquets liants.	Birk et Kurtz (1999); Peterson et coll. (1989)
	La forme d'une molécule est uniquement due au nombre de doublets libres.	Birk et Kurtz (1999); Peterson et coll. (1989)
	La forme d'une molécule est due à sa polarité.	Birk et Kurtz (1999); Nicoll (2001); Peterson et coll. (1989)
Polarité des molécules	Une molécule peut être non polaire uniquement si ses liaisons sont non polaires.	Birk et Kurtz (1999); Peterson et coll. (1989)
	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	Birk et Kurtz (1999)
Liaisons intermoléculaires	La liaison hydrogène est toute liaison covalente mettant en jeu un atome d'hydrogène.	Henderleiter, Smart, Anderson et Elian (2001)
	La formation d'une liaison hydrogène est une réaction chimique de déshydratation.	Henderleiter et coll. (2001)
Polarité des substances	Il n'y a pas de relation entre la polarité d'une substance et sa structure moléculaire.	Butts et Smith (1987); Nicoll (2001)
Changement de phase	L'ébullition entraîne le bris des liaisons covalentes à l'intérieur des molécules.	Bodner (1991); Butts et Smith (1987); Henderleiter et coll. (2001); Mulford et Robinson (2002); Osborne et Cosgrove (1983); Othman et coll. (2008)
	L'évaporation d'un liquide entraîne la disparition de la matière.	Ayas et coll. (2010)

Annexe E : Questionnaire MPP et grille de pointage pour le score pondéré de chaque item

Présentation des items du questionnaire

Voici les vingt items du questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes » (MPP). Les items Q01 et Q15 sont adaptés de Mulford et Robinson (2002); l’item Q04 est adapté de Furió et Calatayud (1996). Tous les autres items sont originaux et ont été développés dans le cadre de la présente recherche. Les questions sont présentées de la façon suivante :

Numéro et titre de la question

Énoncé de la question

Choix a) au premier palier

Justifications (deuxième palier) pour le choix a)

Choix b) au premier palier

Justifications (deuxième palier) pour le choix b)

Choix c) au premier palier

Justifications (deuxième palier) pour le choix c)

Q01 Atome de soufre

Voici une liste de propriétés d'un échantillon de soufre solide :

i. Solide cristallin friable.
 ii. Point de fusion de 113 °C.
 iii. De couleur jaune.

Parmi les propriétés précédentes, laquelle ou lesquelles (s'il y en a) seraient mêmes pour un seul atome provenant de l'échantillon ?

Pondération (sur 5)

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Toutes les propriétés seraient les mêmes.		940
a1	Ces propriétés ne dépendent pas de la quantité de matière.	0	398
a2	Ce sont des propriétés physiques, qui sont les mêmes pour l'atome.	0	316
a3	Un atome est une portion de la matière qui a toutes les propriétés de la matière.	0	226
b	Aucune propriété ne serait la même.		675
b1 *	Ce sont des propriétés physiques, mais seulement les propriétés chimiques seraient les mêmes.	5	331
b2	Un atome ne garde aucune propriété physique ou chimique de la substance qu'il constitue.	3	256
b3	Les propriétés sont une moyenne des propriétés particulière de chaque atome, qui ont tous des propriétés différentes dans le soufre.	2	88
c	La propriété iii seulement serait la même.		368
c1	Un atome ne garde aucune propriété chimique de la substance qu'il constitue, mais garde une propriété physique comme la couleur.	2	160
c2	Un atome ne garde aucune propriété physique de la substance qu'il constitue, mais garde une propriété chimique comme la couleur.	1	83
c3	La couleur est due à la réflexion de la lumière. Un atome peut réfléchir la lumière.	2	125

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page 151.

Q01 Atome de soufre

Voici une liste de propriétés d'un échantillon de soufre solide :

- i. Solide cristallin friable.
- ii. Point de fusion de 113 °C.
- iii. De couleur jaune.

Parmi les propriétés précédentes, laquelle ou lesquelles (s'il y en a) seraient les mêmes pour un seul atome provenant de cet échantillon, si on parvenait à l'isoler?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Toutes les propriétés seraient les mêmes.		940
a1	Ces propriétés ne dépendent pas de la quantité de matière.	0	398
a2	Ce sont des propriétés physiques, qui sont les mêmes pour l'atome.	0	316
a3	Un atome est une portion de la matière qui a toutes les propriétés de la matière.	0	226
b	Aucune propriété ne serait la même.		675
b1 *	Ce sont des propriétés physiques, mais seulement les propriétés chimiques seraient les mêmes.	5	331
b2	Un atome ne garde aucune propriété physique ou chimique de la substance qu'il constitue.	3	256
b3	Les propriétés sont une moyenne des propriétés particulière de chaque atome, qui ont tous des propriétés différentes dans le soufre.	2	88
c	La propriété iii seulement serait la même.		368
c1	Un atome ne garde aucune propriété chimique de la substance qu'il constitue, mais garde une propriété physique comme la couleur.	2	160
c2	Un atome ne garde aucune propriété physique de la substance qu'il constitue, mais garde une propriété chimique comme la couleur.	1	83
c3	La couleur est due à la réflexion de la lumière. Un atome peut réfléchir la lumière.	2	125

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q02 Laquelle est une molécule, formule

Voici les formules chimiques de composés : NH_4Br et H_2SO_4 . Est-ce que les composés représentés par ces formules existent sous la forme de molécules?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Oui, les deux composés sont des molécules.		1564
a1	Une molécule est le regroupement d'au moins deux atomes.	2	874
a2	Une molécule est le résultat de la formation de liaisons chimiques.	2	574
a3	Une molécule est représentée, comme ici, par une formule moléculaire.	1	116
b	Seul le NH_4Br est une molécule.		128
b1	Les molécules sont des entités discrètes et non pas continues.	1	28
b2	Les molécules sont formées uniquement de non-métaux.	1	27
b3	Une molécule ne doit pas former des ions en solution.	0	73
c	Seul le H_2SO_4 est une molécule.		291
c1 *	Les atomes d'une molécule sont liés par des liaisons covalentes.	5	194
c2	Les molécules sont formées uniquement de non-métaux.	2	52
c3	Le H_2SO_4 est organique et les composés organiques sont des molécules.	2	45

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q03 Forme de la molécule d'eau

Qu'est-ce qui cause la molécule d'eau, H₂O, à adopter la forme géométrique qu'elle adopte?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	L'électronégativité élevée de l'oxygène.		685
a1	L'électronégativité de l'oxygène repousse les autres doublets.	0	198
a2	Les atomes d'hydrogène sont attirés par l'oxygène et non pas entre eux.	2	160
a3	L'électronégativité rend les liaisons polaires, donc elles se repoussent entre elles.	0	327
b	La répulsion entre des charges de même signe.		754
b1	Les doublets libres de l'oxygène se repoussent.	4	310
b2	Les atomes d'hydrogène, partiellement positifs, se repoussent.	4	257
b3 *	Les paires d'électrons qui entourent l'atome d'oxygène se repoussent entre elles.	5	187
c	Parce que cette molécule peut faire des liaisons hydrogène.		544
c1	Les liaisons hydrogène sont fortes et ont une grande importance dans la molécule.	0	208
c2	Les liaisons hydrogène orientent les atomes pour atteindre l'angle particulier de la molécule d'eau.	0	220
c3	Pour faire des liaisons hydrogène, il faut que les électrons libres de l'oxygène soient accessibles.	0	116

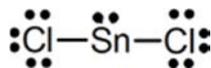
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q04 Laquelle est linéaire

Parmi les molécules suivantes, laquelle a une structure linéaire?



a.



b.



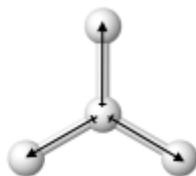
c.

Choix de réponse		Points	Nombre d'étudiants
a	HCN		1119
a1	Il n'y a pas de doublet libre sur l'atome de carbone.	4	336
a2	La liaison triple n'est pas flexible, elle confère de la rigidité à la molécule.	3	549
a3 *	L'atome de carbone est entouré de deux paquets d'électrons.	5	234
b	SnCl ₂		62
b1	Dans cette structure, tous les atomes respectent l'octet.	0	12
b2	L'atome d'étain (Sn) a un doublet libre et deux liaisons et le doublet libre n'influence pas la structure.	1	34
b3	Il s'agit d'une molécule qui est symétrique.	0	16
c	SCl ₂		802
c1	Il s'agit d'une molécule non polaire.	2	151
c2	Les doublets libres sur le soufre n'influencent pas la structure, car ils se repoussent eux-mêmes à 180 °.	2	432
c3	Il s'agit d'une molécule qui est symétrique.	1	219

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q05 La plus polaire, boules et bâtonnets

Laquelle de ces représentations montre une molécule polaire?



a.



b.



c.

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	[représentation triangulaire plane]		339
a1	Les vecteurs de polarité s'annulent entre eux.	1	153
a2	Les vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	0	118
a3	Ses liaisons sont polaires.	2	68
b	[représentation pyramidale à base triangulaire]		1298
b1	Les vecteurs de polarité s'annulent entre eux.	0	30
b2 *	Les vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	5	1224
b3	Ses liaisons sont polaires.	2	44
c	[représentation tétraédrique]		346
c1	Les vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	2	210
c2	L'électronégativité des atomes rend la structure asymétrique.	0	43
c3	Les vecteurs de polarité s'annulent entre eux.	1	93

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q06 HCOOH en solution aqueuse

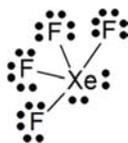
Qu'est-ce qui se produirait si on mélangeait ensemble de l'acide formique (HCOOH) et de l'eau? Notez que l'acide formique est un acide faible.

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Les deux composés se mélangeraient jusqu'à former une solution, car l'acide formique est très soluble dans l'eau.		1236
a1	L'acide formique forme des ions dans l'eau, et comme ces ions sont solubles, il est soluble dans l'eau.	3	514
a2 *	L'acide formique forme des ponts H avec l'eau, et pour cette raison, il est soluble dans l'eau.	5	466
a3	L'acide formique est polaire, et comme l'eau est polaire aussi, il est soluble dans l'eau.	4	256
b	Une partie de l'acide se mélangerait à l'eau pour former une solution, mais la saturation serait rapidement atteinte.		563
b1	L'acide formique est un acide faible, il ne s'ionise que partiellement.	3	459
b2	L'acide formique est un composé organique et les composés organiques sont peu solubles dans l'eau.	2	54
b3	L'acide formique est non-polaire, donc peu soluble dans l'eau.	1	50
c	Ces deux composés ne se mélangeraient pas, ils formeraient un mélange hétérogène.		184
c1	L'acide formique est un acide faible, il ne s'ionise que partiellement.	2	77
c2	L'acide formique est un composé organique et les composés organiques sont insolubles dans l'eau.	1	30
c3	L'acide formique est non-polaire, donc insoluble dans l'eau.	0	77

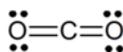
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q07 La plus polaire, Lewis

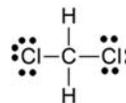
Étant donné les structures de Lewis des molécules suivantes, laquelle parmi celles-ci est la plus polaire?



a.



b.



c.

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	[XeF ₄]		1378
a1	Ses liaisons sont polaires.	2	231
a2	Ses vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	3	1111
a3	Ses vecteurs de polarité s'annulent entre eux.	1	36
b	[CO ₂]		268
b1	Ses liaisons sont polaires.	2	127
b2	Ses vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	0	58
b3	Ses vecteurs de polarité s'annulent entre eux.	1	83
c	[CH ₂ Cl ₂]		337
c1	Deux de ses liaisons sont polaires.	3	119
c2 *	Ses vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	5	148
c3	Ses vecteurs de polarité s'annulent entre eux.	0	70

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q08 Halogène solide

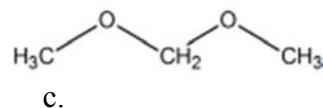
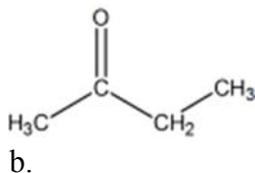
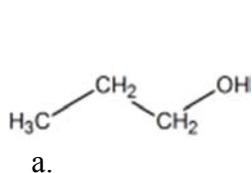
Parmi les halogènes suivants, lequel est solide à température de la pièce et à pression ambiante?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Le chlore, numéro atomique 17		902
a1	L'argon, le voisin du chlore dans le tableau périodique, est un solide.	0	46
a2	Le chlore que l'on utilise dans les piscines est solide (avant d'être dissout).	1	533
a3	Le chlore forme des composés communs (comme le NaCl) qui sont solides.	1	323
b	Le brome, numéro atomique 35		386
b1	Le fluor et le chlore sont gazeux, donc le brome est solide.	1	157
b2	Le brome fait une molécule diatomique, Br ₂ , qui a une masse moléculaire très élevée.	2	160
b3	J'ai déjà vu du brome solide.	0	69
c	L'iode, numéro atomique 53		695
c1	L'iode moléculaire a une masse élevée, donc a tendance à rester au fond du contenant dans lequel il se trouve.	3	218
c2	L'iode forme des composés communs (comme l'iodure de potassium, KI) qui sont solides.	2	155
c3 *	L'iode moléculaire est très polarisable et ses liaisons intermoléculaires sont fortes.	5	322

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q09 La plus polaire, carbonyle

Parmi les molécules suivantes, laquelle est la plus polaire?



Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a		416
a1	3	216
a2	3	142
a3	1	58
b		1012
b1	2	378
b2	5	333
b3	0	301
c		555
c1 *	5	421
c2	0	37
c3	0	97

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Notez que pour cette question, deux choix de réponse valent le maximum de 5 points. La raison en est expliquée à la section « Difficultés conceptuelles sur la polarité », page 163. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q10 Éthanol en solution aqueuse

Que se passe-t-il lorsqu'on prépare une solution d'eau et d'éthanol?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Il y a formation de nouvelles liaisons.		439
a1	Des liaisons hydrogène se forment entre les molécules d'eau et d'éthanol.	3	287
a2	Des liaisons covalentes se forment entre les molécules d'eau et d'éthanol.	0	92
a3	Des liaisons ion-dipôle se forment entre les molécules d'eau et d'éthanol.	0	60
b	Il n'y a pas de bris ni de formation de liaisons.		716
b1	Les molécules d'eau et d'éthanol diffusent l'une dans l'autre, mais elles gardent leur structure intacte.	3	170
b2	La mise en solution est un processus physique, et non pas une réaction chimique.	1	74
b3	L'éthanol est une molécule organique et ne s'ionise pas dans l'eau, donc aucune liaison de l'éthanol ne peut être brisée.	3	472
c	Il y a formation de liaisons et aussi bris d'autres liaisons.		828
c1	Des liaisons covalentes dans les molécules se brisent pour former des ions, et de nouvelles liaisons entre ces ions se forment.	0	323
c2	Les atomes des molécules d'eau et d'éthanol se réorganisent en de nouvelles molécules.	0	247
c3 *	Des liaisons hydrogène entre les molécules des substances pures se brisent et d'autres entre les molécules du mélange se forment.	5	258

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q11 Liaisons intermoléculaires les plus fortes

Voici les structures de Lewis de trois composés. Lequel de ces composés fait les liaisons intermoléculaires les plus fortes?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	H-Se-H		277
a1	C'est la seule molécule qui a une forme « coudée », les autres sont plus symétriques.	2	44
a2	C'est la molécule la plus polaire.	3	96
a3	C'est la seule molécule qui peut faire des liaisons hydrogène.	0	137
b	SO ₂		1095
b1	C'est la seule molécule qui a des liaisons doubles, qui sont très fortes.	0	864
b2	C'est la molécule la plus grosse, parce qu'elle a les plus gros atomes.	0	48
b3 *	C'est la molécule la plus polaire.	5	183
c	SiF ₄		611
c1	C'est la molécule qui a la masse moléculaire la plus élevée.	2	159
c2	C'est la molécule la plus polaire.	1	337
c3	C'est la molécule qui a le plus grand nombre de liaisons.	0	115

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q12 Différence eau/glace

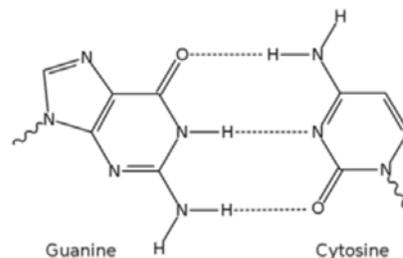
Parmi les différences suivantes, laquelle est la différence la plus importante entre de la glace et de l'eau liquide?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Les molécules d'eau sont flexibles dans le liquide alors qu'elles sont rigides dans le solide.		229
a1	La flexibilité des molécules augmente avec la température.	0	162
a2	Les molécules du solide sont plus dures que celle du liquide.	0	31
a3	C'est la différence la plus remarquable à l'œil nu.	0	36
b	Il y a plus d'espace entre les molécules dans le liquide que dans le solide.		843
b1	Les molécules liquides ont plus d'énergie et prennent donc plus d'espace.	2	213
b2	L'organisation moléculaire est plus ordonnée et compacte dans le solide que dans le liquide.	2	510
b3	Le solide se forme par rapprochement des molécules.	2	120
c	Les molécules se déplacent plus les unes par rapport aux autres dans le liquide que dans le solide.		911
c1 *	Alors que dans un solide, les molécules ne peuvent que vibrer, dans un liquide, elles peuvent vibrer et se déplacer.	5	733
c2	Dans un liquide, les molécules se déplacent alors qu'elles sont immobiles dans un solide	4	108
c3	Les ponts hydrogène dans le liquide sont moins énergétiques que les ponts hydrogène dans le solide.	3	70

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q13 Liaison hydrogène, ADN

Dans le schéma suivant, deux bases de l'ADN sont représentées : la guanine à gauche et la cytosine à droite. Ces deux bases sont dites complémentaires dans l'ADN. Quel énoncé décrit le plus précisément ce que représentent les traits pointillés entre la guanine et la cytosine?



	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Des liaisons covalentes polaires.		556
a1	Ce sont des liaisons hydrogène, donc des liaisons covalentes polaires.	1	399
a2	Les liens dans l'ADN sont forts, donc ce sont des liaisons covalentes.	0	51
a3	Ce sont des liaisons entre deux non-métaux, donc des liaisons covalentes.	0	106
b	Des liaisons intermoléculaires.		1193
b1 *	Ce sont des ponts hydrogène, donc des liaisons intermoléculaires.	5	993
b2	Ce sont des liaisons dipôle-dipôle, donc des liaisons intermoléculaires.	3	147
b3	Ce sont des liaisons faibles parce qu'elles sont représentées par des pointillés, donc des liaisons intermoléculaires.	3	53
c	Des forces électrostatiques.		234
c1	Une liaison serait représentée par des traits pleins (et non par des pointillés), c'est donc plutôt une force.	2	49
c2	Ce sont des ponts hydrogène, donc ce sont des forces et non pas des liaisons.	3	139
c3	Comme les liaisons sont polaires, les charges partielles (positives et négatives) des atomes s'attirent entre elles, ce sont donc des forces électrostatiques.	3	46

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q14 Température d'ébullition, éthanol/méthanol

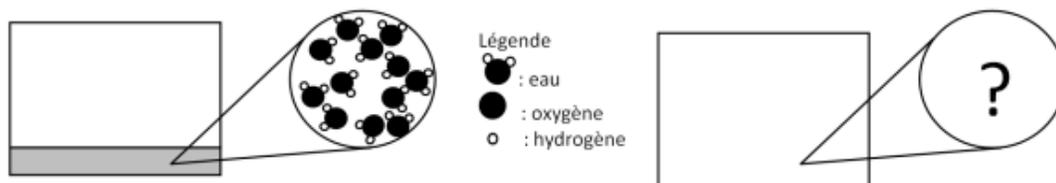
La température d'ébullition du méthanol (CH₃OH) est de 64,7 °C. Celle de l'éthanol (CH₃CH₂OH) est plus élevée, soit de 78,5 °C. Pourquoi y a-t-il une différence entre les deux, et pourquoi la température d'ébullition de l'éthanol est-elle plus élevée?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Cette différence s'explique par la présence, chez l'un des composés, de liaisons hydrogène.		390
a1	Les liaisons hydrogène sont faciles à briser, elles entraînent un abaissement du point d'ébullition.	0	55
a2	Les liaisons hydrogène retiennent les molécules ensemble, elles entraînent une augmentation du point d'ébullition.	2	317
a3	Les liaisons hydrogène peuvent être plus ou moins intenses, selon la forme de la molécule.	1	18
b	Cette différence s'explique par la grosseur des molécules.		591
b1	Une plus grosse molécule a besoin de plus de chaleur pour que ses liaisons (C-H, C-C et C-O) se brisent.	0	219
b2 *	Les plus grosses molécules exercent entre elles des attractions de London plus fortes.	5	262
b3	Plus les molécules ont une masse moléculaire élevée, plus il est difficile de les faire changer de phase, car elles sont plus lourdes.	2	110
c	Cette différence s'explique par le nombre de liaisons à l'intérieur des molécules.		1002
c1	Il y a huit liaisons dans la molécule d'éthanol et seulement cinq dans la molécule de méthanol.	0	459
c2	Les liaisons dans la molécule de méthanol sont des liaisons plus faibles que celles de la molécule d'éthanol.	0	175
c3	La liaison carbone-carbone dans l'éthanol est une liaison forte, cela nécessite beaucoup d'énergie pour la briser.	0	368

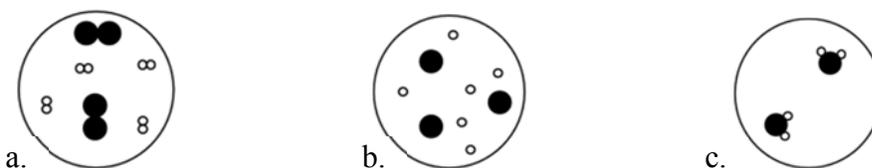
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q15 Vue grossie après évaporation

Le cercle dans la portion gauche montre une vue grossie d'une très petite portion d'eau liquide dans un contenant fermé.



Qu'est-ce que la vue grossie montrerait après l'évaporation de l'eau?



	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	[schéma avec molécules de H ₂ et molécules d'O ₂]		263
a1	L'eau est constituée d'oxygène et d'hydrogène, qui existent sous forme de molécules diatomiques.	1	172
a2	L'eau contient des molécules d'oxygène et d'hydrogène, qui sont libérées lorsque l'eau passe en phase vapeur.	2	60
a3	Lorsque l'eau s'évapore, il reste seulement de l'air, qui est un mélange de plusieurs gaz.	0	31
b	[schéma avec atomes isolés d'H et O]		410
b1	L'eau est constituée d'oxygène et d'hydrogène, qui se détachent en passant en phase gazeuse.	0	234
b2	L'eau contient des atomes d'oxygène et d'hydrogène en solution, qui sont libérés lorsque l'eau passe en phase vapeur.	1	132
b3	Lorsque l'eau s'évapore, il reste seulement de l'air, qui est un mélange de plusieurs gaz.	0	44
c	[schéma avec molécules de H ₂ O]		1310
c1	Lorsque l'eau s'évapore, la plus grande proportion des molécules de la phase vapeur sera des molécules de H ₂ O, mais il peut y avoir quelques molécules d'hydrogène et d'oxygène qui sont formées (pas représentées sur le dessin).	3	266
c2	Lorsque l'eau s'évapore, la quantité de matière contenue dans le contenant diminue, c'est pourquoi il y en a moins sur le dessin.	2	382
c3 *	Lorsque l'eau s'évapore, la phase gazeuse n'est constituée que de molécules d'eau.	5	662

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q16 Flocon de neige

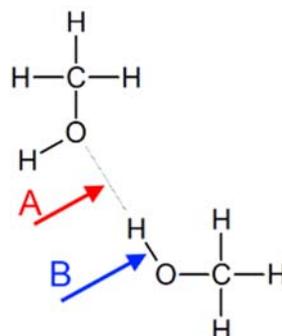
Les flocons de neige ont chacun une forme qui leur est unique. Pourtant, cette forme adopte une structure régulière, dont la géométrie est invariablement la même. Pourquoi les flocons de neige ont-ils cette géométrie particulière?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	À cause des liaisons entre les molécules d'eau.		1059
a1 *	Les ponts hydrogène se positionnent dans l'axe de la liaison covalente de la molécule.	5	623
a2	Les liaisons intermoléculaires rapprochent les molécules et les font cristalliser.	4	310
a3	Les molécules d'eau ont une forme hexagonale, qui est la même forme que celle du flocon.	0	126
b	À cause de la polarité des molécules d'eau.		740
b1	Les pôles positifs sont attirés par les pôles négatifs, ce qui positionne les molécules dans une certaine orientation.	3	493
b2	Les molécules d'eau ont une forme coudée à cause de leur polarité, ce qui donne la forme du flocon.	2	200
b3	Les molécules d'eau ont une forme hexagonale, qui est la même forme que celle du flocon.	0	47
c	À cause de l'électronégativité de l'oxygène.		184
c1	L'oxygène attire les électrons et positionne les autres molécules dans une certaine orientation.	1	63
c2	L'électronégativité de l'oxygène cause la molécule à adopter une forme coudée, et plusieurs formes coudées à la suite donnent la forme du flocon.	0	76
c3	L'électronégativité de l'oxygène cause la molécule à adopter une forme hexagonale, comme la forme du flocon.	0	45

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q17 Où est la liaison hydrogène

Sur le schéma suivant, quelle(s) flèche(s) indique(nt) la position d'une ou plusieurs liaisons hydrogène?

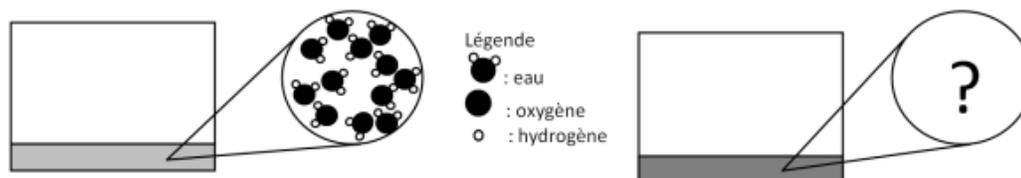


	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	La flèche rouge, identifiée A.		1205
a1	La liaison hydrogène est une liaison entre deux molécules qui ont des atomes d'hydrogène.	3	325
a2 *	L'atome d'hydrogène lié à un atome très électronégatif est attiré par l'atome d'oxygène d'une autre molécule.	5	692
a3	La liaison hydrogène est une liaison entre deux molécules polaires.	4	188
b	La flèche bleue, identifiée B.		317
b1	Une liaison hydrogène est un atome d'hydrogène lié à N, O ou F.	1	165
b2	La liaison hydrogène est une liaison forte, ce qui est le cas d'une liaison covalente polaire comme celle-ci.	0	82
b3	Une liaison hydrogène existe entre un atome d'hydrogène et un atome d'oxygène.	0	70
c	Les deux flèches, A et B, montrent des liaisons hydrogène.		461
c1	Une liaison hydrogène est un atome d'hydrogène lié à N, O ou F.	2	337
c2	La liaison hydrogène est une liaison intermoléculaire forte ou une liaison covalente polaire.	3	66
c3	Une liaison hydrogène existe entre un atome d'hydrogène et un atome d'oxygène.	2	58

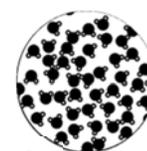
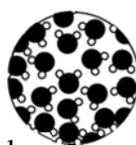
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q18 Vue grossie après solidification

Le cercle dans la portion gauche montre une vue grossie d'une très petite portion d'eau liquide dans un contenant fermé.



Qu'est-ce que la vue grossie montrerait après la solidification de l'eau?



	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	[molécules espacées, de taille normale]		387
a1	Les molécules dans l'eau solide forment des ponts hydrogène entre elles.	4	51
a2 *	Les molécules dans l'eau solide sont plus éloignées les unes des autres que dans l'eau liquide.	5	236
a3	Les molécules dans l'eau solide s'attirent entre elles par des liaisons dipôle-dipôle.	3	100
b	[molécules rapprochées, de taille normale]		1055
b1	Les molécules dans l'eau solide forment des ponts hydrogène entre elles.	3	127
b2	Les molécules dans l'eau solide s'attirent entre elles par des liaisons dipôle-dipôle.	2	121
b3	Les molécules dans l'eau solide sont plus rapprochées les unes des autres que dans l'eau liquide.	2	807
c	[molécules rapprochées, de petite taille]		541
c1	Les molécules dans l'eau solide sont plus petites que dans l'eau liquide.	0	19
c2	Les molécules dans l'eau solide sont plus rapprochées les unes des autres que dans l'eau liquide.	2	482
c3	Les molécules dans l'eau solide forment des ponts hydrogène entre elles.	3	40

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q19 Le plus soluble dans l'eau

Quel composé parmi les suivants est le plus soluble dans l'eau?

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	O=C=O		841
a1	L'eau et le CO ₂ sont polaires.	1	517
a2	Le CO ₂ est soluble dans l'eau puisqu'on le retrouve dans les boissons gazeuses.	1	103
a3	Le CO ₂ est une petite molécule qui se faufile facilement dans les interstices entre les molécules d'eau	0	221
b	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -NH ₂		633
b1	Il n'a pas de liaison double à briser.	0	212
b2	Il forme des ponts H avec l'eau.	3	279
b3	C'est une molécule polaire, tout comme l'eau.	2	142
c	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH=O		509
c1	Ce composé s'ionise dans l'eau.	0	63
c2	Il forme des ponts H avec l'eau.	3	262
c3 *	C'est le composé le plus polaire et l'eau est polaire aussi.	5	184

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Q20 Laquelle est une molécule, diagramme

Lequel ou lesquels des schémas suivants représente (nt) une ou plusieurs molécules?



Schéma 1

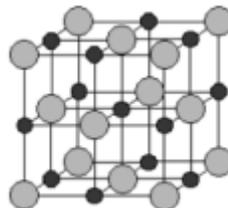


Schéma 2

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	Seul le schéma 1 montre des molécules.		682
a1	Les molécules sont composées uniquement de non-métaux.	3	69
a2	Les atomes d'une molécule sont liés par des liaisons covalentes.	4	290
a3 *	Les molécules sont des entités discrètes et non pas continues.	5	323
b	Seul le schéma 2 montre des molécules.		300
b1	Une molécule est le résultat de la formation de liaisons chimiques.	0	200
b2	La répulsion entre les électrons de valence empêche les atomes de se coller complètement.	0	34
b3	Une molécule est composée d'anions et de cations liés ensemble.	0	66
c	Ces deux schémas montrent des molécules.		1001
c1	Une molécule est tout regroupement d'au moins deux atomes.	2	592
c2	Une molécule est le résultat de la formation de liaisons chimiques.	2	188
c3	Une molécule peut être représentée en montrant les liaisons, ou en montrant seulement les orbitales fusionnées des atomes.	1	221

La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page xxvii.

Annexe F : Difficultés conceptuelles trouvées par le MPP

Item	Choix de réponse	Difficulté conceptuelle	N ^a	%	Catégorie ^b	Sujet	EP ^c
Q01	b2	Les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la substance qu'ils constituent.	256	12,9%	FR-SA	7- Nature corpusculaire de la matière	EP02
Q01	a1, a2, a3, c1, c2, c3	Les atomes ont des propriétés macroscopiques pareilles à celles de l'élément qu'ils constituent.	1308	66,0%	CA-ECT	7- Nature corpusculaire de la matière	EP02
Q02	a1, a2, a3	Tout regroupement d'atomes est une molécule.	1564	78,9%	FR-SA	1- Notion de molécule	EP05
Q03	a2, b2	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les atomes périphériques.	417	21,0%	FR-DR	2- Forme des molécules	EP24
Q03	a1, b1	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les doublets libres.	508	25,6%	FR-DR	2- Forme des molécules	EP24
Q03	a3	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les électrons liants ET les liaisons ne se repoussent que lorsqu'elles sont polaires.	327	16,5%	FR-DR et plus	2- Forme des molécules	EP24
Q03	c1, c2, c3	Les liaisons hydrogène donnent la forme à la molécule.	544	27,4%	CA-Conn	2- Forme des molécules	EP24
Q04	a1	La forme d'une molécule est causée par la présence ou l'absence de doublets libres sur l'atome central.	336	16,9%	FR-DR	2- Forme des molécules	EP24
Q04	a2	La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide.	549	27,7%	CA-Conn	2- Forme des molécules	EP24
Q04	b2, c2	Une molécule a la forme de sa structure de Lewis.	466	23,5%	FR-SA	2- Forme des molécules	EP24
Q04	b3, c3	Une molécule symétrique est linéaire.	235	11,9%	FR-SA	2- Forme des molécules	EP24
Q05	a2, c1	Erreur dans l'addition vectorielle.	328	16,5%	Carence	3- Polarité	EP26
Q05	a1, c3	Argument non polaire pour polaire.	246	12,4%	Ag-ArgOpp	3- Polarité	EP19
Q06	a3	La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à la polarité.	256	12,9%	CA-ImpFac	6- Solubilité et mise en solution	EP27
Q06	a1, b1, c1	La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à l'ionisation.	1050	53,0%	CA-ImpFac	6- Solubilité et mise en solution	EP27
Q07	a2, b2	Erreur dans la prédiction de la forme d'une molécule OU Erreur dans l'addition vectorielle.	1169	59,0%	Carence	2- Forme des molécules	EP24
Q07	a1, b1, c1	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	477	24,1%	FR-DR	3- Polarité	EP25
Q08	c1	Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	218	11,0%	CA-ECT	5- État de la matière	EP29
Q08	a2, a3, c2	Les éléments ont les mêmes propriétés que les composés qu'ils forment.	1011	51,0%	CA-ECT	7- Nature corpusculaire de la matière	EP03
Q08	a1, b1, b2, b3	Méconnaissance d'éléments communs.	432	21,8%	Carence	7- Nature corpusculaire de la matière	EP03

^a N ≡ Nombre d'étudiants; ^b Catégorie ≡ Catégorie de raisonnement; ^c EP ≡ Énoncé propositionnel.

Item	Choix de réponse	Difficulté conceptuelle	N ^a	%	Catégorie ^b	Sujet	EP ^c
Q09	b3	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	301	15,2%	FR-DR	3- Polarité	EP25
Q09	a1	Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	216	10,9%	FR-SA	3- Polarité	EP25
Q09	b1	Une liaison double est plus polaire qu'une liaison simple.	378	19,1%	FR-DR	3- Polarité	EP21
Q10	b3	Aucune liaison intermoléculaire n'est formée ni brisée lors de la mise en solution.	472	23,8%	FR-SA	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q10	b1, b2	Il n'y a pas de liaisons intermoléculaires entre les molécules dans une solution.	244	12,3%	CA-CcomP	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q10	c2	La mise en solution de composés moléculaires se solde en la réorganisation du solvant et du soluté en de nouveaux composés.	247	12,5%	CA-PcomC	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q10	a3, c1	Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	383	19,3%	CA-PcomC	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q10	a1	Lors de la mise en solution, des liaisons intermoléculaires se forment entre les particules de solvant et de soluté, mais aucun lien n'est brisé.	287	14,5%	FR-DR	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q11	a2, c2	Erreur dans la prédiction de la polarité d'une molécule (sans pouvoir identifier la raison).	433	21,8%	Carence	3- Polarité	EP19
Q11	b1, c3	Les liaisons intermoléculaires sont les liaisons à l'intérieur des molécules.	979	49,4%	FR-SA	4- Liaisons chimiques	EP10
Q11	b2, c1	L'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement causée par la taille des molécules.	207	10,4%	FR-DR	4- Liaisons chimiques	EP11
Q12	a1, a2, a3	Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	229	11,5%	CA-ECT	7- Nature corpusculaire de la matière	EP03
Q12	b1, b2, b3	Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	843	42,5%	FR-SA	8- Structure sous-microscopique des solides	EP31
Q13	a1, a2	Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	450	22,7%	FR-SA	4- Liaisons chimiques	EP07
Q14	a1, a2, a3	Erreur dans l'identification des molécules faisant des liaisons hydrogène (certaines en font, mais l'étudiant dit qu'elles n'en font pas).	390	19,7%	Carence	4- Liaisons chimiques	EP14
Q14	b1, c1, c2, c3	L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	1221	61,6%	CA-PcomC	5- État de la matière	EP30
Q15	a1, b1, b2, b3, c1	L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	848	42,8%	CA-PcomC	5- État de la matière	EP30
Q15	a3, c2	L'évaporation entraîne une disparition de la matière.	413	20,8%	Carence	5- État de la matière	EP30
Q16	b2, c2	La forme d'une molécule est causée par sa polarité.	276	13,9%	CA-Conn	3- Polarité	EP24
Q16	a3, b3, c3	Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	218	11,0%	CA-ECT	7- Nature corpusculaire de la matière	EP03
Q16	a2	Explication téléologique.	310	15,6%	Carence	8- Structure sous-microscopique des solides	EP31

^aN ≡ Nombre d'étudiants; ^bCatégorie ≡ Catégorie de raisonnement; ^cEP ≡ Énoncé propositionnel.

Item	Choix de réponse	Difficulté conceptuelle	N ^a	%	Catégorie ^b	Sujet	EP ^c
Q16	b1, c1	La structure de l'eau solide est surtout attribuable à des liaisons dipôle-dipôle.	556	28,0%	CA-ImpFac	8- Structure sous-microscopique des solides	EP31
Q17	b1, b2, b3, c1, c2, c3	Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	778	39,2%	FR-SA	4- Liaisons chimiques	EP07
Q17	a1	Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	325	16,4%	FR-DR	4- Liaisons chimiques	EP14
Q18	a3, b2	Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	221	11,1%	FR-SA	4- Liaisons chimiques	EP14
Q18	b3, c2	Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	1289	65,0%	FR-SA	8- Structure sous-microscopique des solides	EP31
Q19	a1	Erreur dans la prédiction de la polarité d'un composé (sans pouvoir identifier la raison).	517	26,1%	Carence	3- Polarité	EP19
Q19	a3	La mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant.	221	11,1%	CA-CcomP	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q19	b2, c2	La formation de ponts H avec l'eau assure qu'un composé y est très soluble.	541	27,3%	CA-ImpFac	6- Solubilité et mise en solution	EP27
Q19	b1	Les liaisons covalentes se brisent lors de la mise en solution.	212	10,7%	CA-PcomC	6- Solubilité et mise en solution	EP28
Q20	c1, c2, c3	Tout regroupement d'atomes est une molécule.	1001	50,5%	FR-SA	1- Notion de molécule	EP05
Q20	a2	Une molécule est formée d'atomes liés par des liaisons covalentes.	290	14,6%	FR-DR	1- Notion de molécule	EP05
Q20	b1	Les liaisons chimiques sont nécessairement représentées par des bâtonnets.	200	10,1%	Carence	4- Liaisons chimiques	EP07

^aN ≡ Nombre d'étudiants; ^bCatégorie ≡ Catégorie de raisonnement; ^cEP ≡ Énoncé propositionnel.

Annexe G : Certificats d'éthique

Voici les certificats d'éthique obtenus du Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR) de l'Université de Montréal pour la présente recherche.



No de certificat / Renouvellement
CPER-09-107-D

Certificat d'approbation éthique Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR)

Titre du projet Les conceptions des élèves du niveau collégial en sciences de la nature sur la géométrie moléculaire

Déclaration du Comité et engagements du ou des responsable(s) du projet

Le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR), selon les procédures en vigueur, a examiné le projet de recherche ici mentionné et a conclu que, tel que proposé, ledit projet respecte les règles d'éthique énoncées dans la « Politique sur la recherche avec des êtres humains » de l'Université de Montréal.

Tout changement anticipé au protocole de recherche devra être communiqué au CPÉR qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique. Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave devra être immédiatement signalé au CPÉR.

Responsable(s) du projet

Nom: **Caroline CORMIER**

Titre: Candidat(e) à la maîtrise

Faculté: Sciences de l'éducation

Diplôme postulé (grade et titre):

M. Éd.

Département, école: DID

Directeur(s) / co-directeur(s) de recherche:

Jesus Vazquez-Abad, professeur agrégé, Faculté des sciences de l'éducation - Didactique

Code permanent / matricule:

Financement

Subvention Contrat Non financé Statut:

Organisme(s):

No d'octroi:
(de l'organisme)

Programme:

No Prophecy:

Titre et détails de l'octroi:
(s'ils diffèrent du projet)

Modalités d'application du certificat

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique. Un certificat renouvelé sera donc émis sur présentation au CPÉR d'un rapport de suivi dans les délais prescrits ci-dessous. Un rapport doit également être déposé à la fin du projet. Le formulaire de rapport de suivi est disponible au www.scedu.umontreal.ca/recherche/ethique.html.

Date d'émission du certificat: 16 octobre 2009

Date du prochain suivi: 1 octobre 2010

Date de fin du certificat: 1 novembre 2010

François Bowen, président
Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche
Université de Montréal



Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR)
Facultés de l'aménagement, de droit, de musique, des sciences
de l'éducation et de théologie et de sciences des religions

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE

Le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR), selon les procédures en vigueur et en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche suivant et conclu qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal.

Titre du projet	Les conceptions alternatives des élèves de sciences de la nature en géométrie moléculaire
Étudiant requérant	Caroline Cormier candidate au doctorat Didactique Faculté des sciences de l'éducation
Direction	Jesús Vázquez Abad professeur agrégé, Didactique, Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au CPÉR qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique.

Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au CPÉR.

Selon les règles universitaires en vigueur, un **suiti 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 CPÉR.

Pierre Lapointe, président
Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche
Université de Montréal

19 / 10 / 2010
Date de délivrance

01 / 06 / 2013
Date de fin de validité

adresse postale
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal QC H3C 3J7

Faculté des sciences de l'éducation
Pavillon Marie-Victorin
90, av. Vincent-d'Indy, bur. B-504
Montréal QC H2V 2S9

Téléphone : 514-343-6111 poste 4579
Télécopieur : 514-343-2283
cper@umontreal.ca
www.scedu.umontreal.ca/recherche/ethique.html

Document d'information distribué aux étudiants



Faculté des sciences de l'éducation
Département de didactique

Les conceptions alternatives des élèves de sciences de la nature en géométrie moléculaire

Responsable du projet : Caroline Cormier

Département ou groupe de recherche : Département de chimie du cégep André-Laurendeau

Adresse postale : 1111, rue Lapierre, ville Lasalle, Qc, H8N 2J4

Adresse courriel :

BUT GÉNÉRAL DU PROJET

Ce projet vise à étudier les conceptions des élèves de cégep en sciences de la nature sur la structure des molécules afin de mieux connaître les obstacles à l'apprentissage de cette notion.

PROCÉDURE ET AVANTAGES DE PARTICIPER À L'ÉTUDE

Vous avez été invité par votre enseignant(e) de chimie à répondre à un questionnaire d'une dizaine de questions sur des notions touchant la structure des molécules. La passation du questionnaire se fera durant votre cours de chimie et durera environ 30 minutes. Cette étude permettra d'identifier les conceptions alternatives fréquentes qui peuvent avoir un impact sur l'apprentissage de la chimie. Étant donné la nature du projet, votre participation n'entraîne pas de risque.

CONFIDENTIALITÉ, PARTICIPATION VOLONTAIRE ET DROIT DE RETRAIT

Répondez de façon anonyme au questionnaire, c'est-à-dire n'indiquez pas votre nom. Votre participation à ce projet est volontaire. Cela signifie que vous acceptez de participer au projet sans aucune contrainte ou pression extérieure, et que par ailleurs vous êtes libre de mettre fin à votre participation en tout temps au cours de cette recherche. Si vous décidez de vous retirer de l'étude, les données vous concernant seront détruites et ne seront pas utilisées pour la recherche.

En répondant au questionnaire, vous acceptez que l'équipe de recherche puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, conférences et communications scientifiques) les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant de vous identifier ne soit divulguée publiquement.

DES QUESTIONS SUR LE PROJET OU SUR VOS DROITS?

L'étude est réalisée par Caroline Cormier, enseignante de chimie au cégep André-Laurendeau. Vous pouvez vous adresser à elle pour toutes questions relatives à votre participation à l'étude.

Le Comité plurifacultaire d'éthique de la recherche (CPÉR) de l'Université de Montréal a approuvé le projet de recherche auquel vous allez participer. Pour toute autre question concernant vos droits en tant que sujet de recherche, vous pouvez contacter l'ombudsman de l'Université de Montréal, au numéro de téléphone (514) 343-2100 ou à l'adresse courriel suivante: ombudsman@umontreal.ca (l'ombudsman accepte les appels à frais virés).

REMERCIEMENTS

Votre collaboration est essentielle à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier.