



# Les conceptions en géométrie moléculaire d'étudiants de Sciences de la nature

Modes de raisonnement et  
diagnostic de conceptions  
alternatives fréquentes en chimie

**Caroline Cormier**

La présente recherche a été subventionnée par le  
ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport dans  
le cadre du Programme d'aide à la recherche  
sur l'enseignement et l'apprentissage (PAREA).



Cégep **André-Laurendeau**

Recherche subventionnée par PAREA et réalisée au cégep André-Laurendeau. Le contenu du présent rapport n'engage que la responsabilité de l'établissement et de l'auteur. Dans ce document, l'emploi du masculin est épïcène sans aucune intention discriminatoire et uniquement dans le but de faciliter la lecture.

#### *Confidentialité*

Les données concernant les étudiants ont été codées de sorte qu'un observateur externe ne puisse identifier les sujets d'expérimentation.

#### *Consentement et droit de retrait*

Tous les étudiants ont été informés de leur implication dans la recherche ainsi que de l'utilisation des données en toute confidentialité. Les étudiants qui, pour toute raison, ne désiraient ou ne pouvaient pas participer à cette étude étaient libres, sans être pénalisés, de ne pas s'engager dans le projet. De plus, les participants conservaient le droit de se retirer de l'étude en tout temps sans aucun préjudice.

#### *Chercheure*

Caroline Cormier, M.Éd., enseignante de chimie

#### *Révision linguistique*

Jacinthe Laforge, [www.jacinthelaforte.com](http://www.jacinthelaforte.com)

#### *Traduction du résumé*

Edith Skewes-Cox, trad. a.

#### *Conception graphique et photo de la page couverture*

Caroline Cormier

#### *Impression*

Presse Papiers, 5950, boul. Cousineau, St-Hubert (Québec) J3Y 9A9

Une version électronique de ce rapport est disponible au <http://www.cdc.qc.ca/index.php/fr/outils-de-recherche/rapports-parea.html>

Imprimé à St-Hubert

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec – 2013

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada – 2013

ISBN 978-2-920928-60-2

© Tous droits réservés Caroline Cormier, 2013

## Remerciements

Je remercie du fond du cœur les milliers d'étudiants qui ont participé à cette recherche. Merci pour votre sérieux et le temps que vous avez consacré à mon projet de recherche.

La participation de ces étudiants aurait été impossible sans la collaboration d'une centaine de profs de chimie – et parfois d'autres disciplines de sciences – qui ont libéré du temps dans leurs cours, toujours très chargés, pour que leurs étudiants puissent répondre à mon questionnaire. Sans vous, les profs, rien n'aurait été possible. C'est à vous que je m'adresse au fil de ces pages; j'espère que mes conclusions et mes remarques sauront vous intéresser. Merci à tous!

Pour leur expertise, leurs bons conseils et leur soutien, je remercie les membres de mon équipe de recherche à l'Université de Montréal, en particulier mon directeur de thèse, Jesús Vázquez, et mon ancien assistant de recherche, maintenant collègue enseignant, François Arseneault-Hubert. Je lève mon chapeau à Isabelle Harpin, informaticienne à la MATI-Montréal, pour son perfectionnisme et sa disponibilité. Grâce à elle, la plateforme ConSOL en ligne est un franc succès.

Pour son travail qui allait bien au-delà de la révision linguistique, je remercie chaleureusement Jacinthe Laforte, qui m'a conseillée avec pertinence et encouragée durant toute la rédaction de ce rapport.

Je tiens aussi à remercier mes collègues du département de chimie du cégep André-Laurendeau, Suzanne, Bruno, Christian, Véronique, Julie, Josée, François, Pierre et Marc, pour m'avoir écoutée et avoir alimenté mes réflexions pendant ces trois dernières années. Merci, meilleur département de chimie du monde!

Du cégep André-Laurendeau, je remercie aussi sincèrement pour leur soutien M. Alain Desjarlais, directeur des études, M. Yvan O'Connor, directeur des ressources humaines, et M. Hervé Pilon, directeur général. Merci aussi à Mme Louise Ross, conseillère pédagogique à la recherche, pour son aide.

Enfin, merci à Bruno Voisard, mon premier lecteur, premier critique et première source d'inspiration, dans la vie, au cégep, dans mes recherches. Je suis une meilleure personne grâce à toi.

### *Note*

L'étude présentée ici constitue une partie de la recherche doctorale que je mène présentement au département de didactique de l'Université de Montréal, sous la supervision de Jesús Vázquez Abad.



# Les conceptions en géométrie moléculaire des étudiants de Sciences de la nature

Mots-clés

Didactique de la chimie – difficultés d'apprentissage – conceptions alternatives – modes de raisonnement – outil diagnostique à deux paliers

## Résumé

L'apprentissage des sciences peut se buter à un grand nombre d'obstacles. Au-delà du fait que les concepts sont nombreux et peu familiers aux étudiants, des conceptions alternatives au sein des connaissances antérieures de ces derniers peuvent nuire à leur compréhension des notions. Ces conceptions alternatives sont les représentations personnelles, souvent tacites, qui sont en désaccord avec la théorie scientifique acceptée. Si certaines d'entre elles proviennent d'une interprétation naïve de la nature, d'autres sont issues de l'enseignement lui-même. En effet, même si on enseigne les concepts scientifiques avec justesse, clarté et exactitude, les étudiants peuvent les comprendre différemment de ce que l'enseignant ou le manuel entendait. Cette transcription fautive des contenus enseignés dans les structures cognitives des étudiants peut faire apparaître des conceptions alternatives.

Bien qu'elles soient répandues chez les apprenants, les conceptions alternatives généralement difficiles à détecter par les enseignants dans un contexte de classe traditionnel. Leur remédiation nécessite toutefois une intervention pédagogique qui les prend en compte. Ainsi, il est nécessaire de déployer des moyens pertinents pour diagnostiquer les conceptions les plus fréquentes dans l'esprit des étudiants collégiaux.

Cette étude propose un inventaire des conceptions alternatives les plus fréquentes qui ont été diagnostiquées chez un échantillon de plus de 2000 étudiants du programme de Sciences de la nature collégial québécois au sujet de concepts de chimie importants. La molécule, la polarité des liaisons et des molécules, la liaison chimique et les phénomènes macroscopiques comme le changement de phase et la mise en solution sont les concepts qui ont fait l'objet de ce diagnostic.

Un questionnaire diagnostique à deux paliers à choix multiples, intitulé « Molécules, polarité et phénomènes », a été développé dans le cadre de la présente étude. Ce questionnaire, administré sur une plateforme Web, a servi d'outil de collecte de données. Au préalable, des entrevues sur différents sujets de chimie ont été menées avec onze étudiants de cégep en Sciences.

Entre autres conceptions diagnostiquées, cette recherche a révélé que la plupart des étudiants croient que tout regroupement d'atomes forme une molécule (jusqu'à 79 % des étudiants), que les liaisons covalentes se brisent lors de l'évaporation (jusqu'à 62 % des étudiants) et que les éléments ont les propriétés des composés qu'ils constituent (51 % des étudiants).

Les résultats montrent également que la détermination de la polarité des molécules et la prédiction des produits de l'évaporation posent encore des difficultés aux étudiants, qu'ils soient en première ou en deuxième année du programme de Sciences, qu'ils viennent d'un cégep public ou d'un collège privé.

Comme certaines conceptions alternatives sont attribuables à des erreurs de raisonnement, une même erreur de raisonnement pouvant être liée à plus d'une conception alternative, une typologie des modes de raisonnement, telle que dégagée des résultats de la phase pilote de la recherche, a été construite. Les huit catégories de raisonnement, dont l'argument opposé, l'explication corpusculaire tautologique et le demi-raisonnement, servent à mettre en relation les conceptions alternatives les unes avec les autres. Ainsi connaître le mode de raisonnement qui explique certaines conceptions alternatives peut effectivement fournir une base cognitive sur laquelle appuyer une stratégie de changement conceptuel.

Les produits de cette étude sont l'outil diagnostique à deux paliers (annexe 2), l'inventaire des conceptions alternatives (annexe 3) et la typologie des modes de raisonnement (annexe 4).

# Science students' alternative conceptions of molecular geometry

## Keywords

Chemistry teaching – learning impediments – alternative conceptions – reasoning modes – two-tier diagnostic instrument

## Abstract

The teaching of science can be very challenging. The concepts themselves are often unfamiliar to students and students' prior knowledge can include alternative conceptions. These alternative conceptions are personal, often tacit, understandings that differ from accepted scientific theory. Some may originate from a naive interpretation of natural phenomena while others are a result of the way science is taught. In fact, even when concepts are taught with great clarity and accuracy, students can understand something other than what the teacher or textbook intended. This faulty transcription of subject matter into students' cognitive structures can lead them to develop alternative conceptions.

Although widespread among learners, alternative conceptions are often difficult to identify in a traditional class setting. However, since teachers need to be aware of their students' conceptions in order to remedy them, it is necessary to deploy pertinent means to diagnose the most common conceptions of college students.

Some alternative conceptions are due to errors in reasoning. A single reasoning error might be related to several alternative conceptions. Knowing the modes of reasoning behind several alternative conceptions can provide a cognitive foundation for a conceptual change strategy.

The present study proposes an inventory of the most common alternative conceptions of major chemistry concepts as diagnosed from a sample of more than 2000 students enrolled in the Quebec pre-university Science program. The concepts in question are the molecule, bond polarity and molecular polarity, chemical bonding and macroscopic phenomena such as phase changes and solubility.

An online two-tier multiple-choice diagnostic instrument entitled "*Molécules, polarité et phénomènes*" was developed for this study to collect data. In addition, 11 college students studying Science were interviewed on various chemistry topics.

Among the alternative conceptions identified, the study found that most students believe that all groups of atoms form molecules (up to 79% of the sample), that covalent bonds are broken during evaporation (up to 62% of the sample) and that elements have the properties of their compounds (51% of the sample).

Other results show that college students still have difficulty determining molecular polarity and predicting the products of evaporation, whether they are in first or second year, and whether they attend a private or a public college.

A typology of reasoning modes was built, based on the findings of the study's pilot phase. Eight reasoning types such as "opposing argument," "tautological particulate explanation" and "half-reasoning" are used to show how alternative conceptions are interrelated.

The products of this study are the two-tier diagnostic instrument (Annex 2), the inventory of alternative conceptions (Annex 3) and the typology of reasoning errors (Annex 4).

# Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	iii
Abstract.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures.....	xiii
1. Problématique.....	1
L'enseignement des sciences.....	1
La chimie comme discipline scolaire.....	1
Difficultés d'apprentissage.....	2
Niveaux de représentation multiples en chimie.....	3
Les conceptions alternatives.....	4
L'origine des conceptions alternatives.....	8
De nombreuses conceptions trouvées.....	10
Nécessité de faire une pause dans l'inventaire.....	11
Quelle taxonomie développer?.....	11
L'apprentissage est le changement conceptuel.....	13
Pertinence de la recherche.....	15
2. Objectifs de la recherche.....	17
Retombées de la recherche.....	18
3. Notions de chimie.....	19
Grandes idées dans l'enseignement de la chimie.....	19
Analyse didactique du contenu.....	19
Le comportement et la structure de la matière.....	19
Substances pures : quatre catégories au niveau macroscopique.....	21
Quelques notions sur la liaison chimique.....	24
La polarité : équivoque à trois niveaux.....	24
Nature sous-microscopique pour expliquer les phénomènes macroscopiques.....	29

Nature corpusculaire, polarité et état de la matière : un résumé.....	31
4. Cadre conceptuel.....	33
Les conceptions alternatives répertoriées dans les écrits scientifiques .....	33
Nature corpusculaire de la matière .....	33
Liaison chimique .....	36
Géométrie moléculaire .....	38
Phénomènes macroscopiques.....	40
Le raisonnement logique en sciences.....	42
Propositions logiques.....	42
Raisonnement logique et conceptions alternatives.....	44
Heuristiques en chimie.....	45
L'explication comme tâche cognitive en chimie.....	49
<i>P-prims</i> en chimie.....	49
Le diagnostic des conceptions alternatives .....	51
Définir le contenu .....	53
Obtenir des informations sur les conceptions alternatives des étudiants .	54
Développer le test diagnostique.....	55
Précaution pour le développement d'items diagnostiques à deux paliers .....	55
Sommaire du cadre conceptuel.....	57
5. Méthodologie .....	59
Échantillon.....	59
Phase préliminaire : exploration des conceptions et choix de l'échantillon .....	60
Phase pilote : design de l'outil et modes de raisonnement .....	60
Phase principale : détermination des conceptions répandues.....	61
Outils de collecte de données.....	63
Phase préliminaire : entrevues.....	63
Phase pilote : questionnaire à justifications ouvertes.....	64
Phase principale : questionnaire diagnostique à deux paliers sur ConSOL	67
Traitement et analyse des données.....	71
Phase préliminaire .....	71
Phase pilote .....	71

Phase principale .....	72
6. Résultats.....	75
Phase préliminaire.....	75
Phase pilote.....	76
Taux de succès au premier palier .....	76
Justifications au deuxième palier .....	78
Typologie des erreurs de raisonnement.....	83
Phase principale.....	97
Score pondéré pour chaque item.....	97
Conceptions alternatives relevées.....	104
Corrélations entre les conceptions .....	119
7. Discussion .....	123
La définition de la molécule : un problème criant .....	123
Les atomes ont les propriétés des substances, les éléments ont celles de leurs composés.....	126
Trois items caractéristiques pour les étudiants ayant le plus de difficulté... 128	
Polarité des molécules : la base pose encore problème.....	129
Évaporation de l'eau : ne donne pas de l'eau pour plusieurs étudiants ....	130
Où est la liaison hydrogène? Partout! .....	133
Habilités de raisonnement : apprendre à expliquer .....	134
Limites de la recherche.....	135
Pistes à explorer.....	137
8. Conclusion.....	139
Références.....	141
Annexe 1 – Carte conceptuelle des notions visées par cette étude.....	149
Annexe 2 – Questionnaire à choix multiples à deux paliers .....	151
Q01 Atome de soufre .....	153
Q02 Laquelle est une molécule, formule .....	154
Q03 Forme de la molécule d'eau .....	155
Q04 Laquelle est linéaire .....	156
Q05 La plus polaire, boules et bâtonnets .....	157
Q06 HCOOH en solution aqueuse .....	158

Q07 La plus polaire, Lewis .....	159
Q08 Halogène solide .....	160
Q09 La plus polaire, carbonyle .....	161
Q10 Éthanol en solution aqueuse .....	162
Q11 Liaisons intermoléculaires les plus fortes.....	163
Q12 Différence eau/glace.....	164
Q13 Liaison hydrogène, ADN.....	165
Q14 Température d'ébullition, éthanol/méthanol .....	166
Q15 Vue grossie après évaporation.....	167
Q16 Flocon de neige.....	168
Q17 Où est la liaison hydrogène.....	169
Q18 Vue grossie après solidification .....	170
Q19 Le plus soluble dans l'eau .....	171
Q20 Laquelle est une molécule, diagramme .....	172
Annexe 3 – Inventaire de conceptions alternatives .....	173
Annexe 4 – Typologie des erreurs de raisonnement.....	176

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Catégories de substances pures .....	21
Tableau 2 : Heuristiques contraignant le raisonnement en chimie.....	47
Tableau 3 : Description de l'échantillon expérimental total pour chacune des phases de l'étude.....	59
Tableau 4 : Description de l'échantillon pour les entrevues cliniques de la phase préliminaire .....	60
Tableau 5 : Description de l'échantillon pour la phase pilote .....	61
Tableau 6 : Échantillon d'étudiants ayant participé à la phase principale du projet, selon leur établissement d'enseignement .....	63
Tableau 7 : Moyenne au premier palier du test à choix multiples et justifications ouvertes, selon la progression dans leurs études .....	77
Tableau 8 : Conceptions alternatives répertoriées au sujet de la forme des molécules à partir des justifications d'étudiants .....	79
Tableau 9 : Conceptions alternatives répertoriées au sujet des liaisons intermoléculaires à partir des justifications d'étudiants.....	82
Tableau 10 : Typologie des erreurs de raisonnement expliquant les conceptions alternatives observées.....	84
Tableau 11 : Coefficients de corrélation de Pearson ( <i>R</i> ) entre le score pondéré à chaque item et la session.....	101
Tableau 12 : Items pour lesquels le score pondéré est différent selon le genre.....	102
Tableau 13 : Sous-ensembles homogènes de régions du Québec quant au score pondéré moyen au test « molécules, polarité et phénomènes ».....	103
Tableau 14 : Aperçu des conceptions alternatives diagnostiquées par le test « Molécules, polarité et phénomènes ».....	104
Tableau 15 : Principales conceptions alternatives sur la notion de molécule.....	105
Tableau 16 : Principales conceptions alternatives sur la forme des molécules.....	107
Tableau 17 : Principales conceptions alternatives sur la polarité.....	109
Tableau 18 : Erreurs observées dans la prédiction de la polarité.....	110
Tableau 19 : Principales conceptions alternatives sur les liaisons chimiques.....	112
Tableau 20 : Principales conceptions alternatives sur l'état de la matière.....	113
Tableau 21 : Principales conceptions alternatives sur la solubilité et la mise en solution .....	115
Tableau 22 : Principales conceptions alternatives sur la nature corpusculaire de la matière .....	117
Tableau 23 : Principales conceptions alternatives sur la structure sous-microscopique des solides.....	118
Tableau 24 : Coefficients de corrélation entre le score pondéré de chaque item et le score pondéré total.....	119
Tableau 25 : Proportion d'intersection pour les conceptions alternatives diagnostiquées dans plus d'un item .....	122
Tableau 26 : Résumé des items Q05, Q15 et Q17, les items d'ancrage pour les étudiants ayant le moins bien performé.....	128



## Liste des figures

Figure 1 : Résumé schématique des objectifs de la recherche .....	17
Figure 2 : Représentation de la surface électrostatique de l'acétone, une molécule polaire.....	26
Figure 3 : Vecteurs de polarité des liaisons des molécules de sélénure d'hydrogène (H <sub>2</sub> Se) et d'oxyde d'hydrogène (H <sub>2</sub> O).....	27
Figure 4 : Deux molécules polaires et deux molécules non polaires .....	28
Figure 5 : Continuum de l'intensité relative des liaisons chimiques .....	37
Figure 6 : Exemple d'un item où chaque justification au deuxième palier correspond manifestement à une seule option du premier palier .....	56
Figure 7 : Exemple d'un item où le deuxième palier ne représente pas des justifications pour le choix au premier palier .....	57
Figure 8 : Rappel des objectifs de la recherche, selon les phases de l'étude .....	59
Figure 9 : Un item à deux paliers à justification ouverte développé dans le cadre de cette étude .....	66
Figure 10 : Saisie d'écran du premier palier d'un item à choix multiples sur ConSOL .....	68
Figure 11 : Saisie d'écran du deuxième palier de l'item présenté à la figure 10, lorsque le choix au premier palier est B) .....	69
Figure 12 : Énoncé de la question et choix de réponse du premier palier pour l'item « Laquelle est une molécule, formule » (Q02).....	74
Figure 13 : Deux items sur la géométrie moléculaire développés lors de la phase pilote de la recherche.....	78
Figure 14 : Deux items à deux paliers sur les liaisons intermoléculaires développés dans le cadre de cette étude.....	81
Figure 15 : Modèle tridimensionnel de la molécule de chlorure de thionyle (à gauche) et de l'ion ammonium (à droite) .....	87
Figure 16 : Photographies des modèles planaires construits par les étudiants 87	
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) .....	90
Figure 18 : Diagramme de Venn pour la conception alternative « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides » (Q12 et Q18) .....	120
Figure 19 : Diagramme de Venn pour la conception alternative « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire » (Q09 et Q19).....	121
Figure 20 : Choix de réponse au premier palier de la question Q20.....	124
Figure 21 : Diagramme de Venn représentant la distribution des étudiants ayant incorrectement répondu aux items Q05, Q15 et Q17 .....	129



# 1. Problématique

## L'enseignement des sciences

La pertinence de l'enseignement des sciences n'est pas à remettre en question. De nombreuses raisons culturelles et sociales motivent 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).

Après une formation de base au primaire et au secondaire, certains étudiants décident de poursuivre leur formation scientifique au collégial. 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 maîtred'œuvre du programme. Ces cours visent à développer des compétences, celles-ci représentant les composantes scientifiques rigoureuses visées par le Ministère, les institutions 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, 2008), étaient inscrits en Sciences de la nature, un programme offert par tous les cégeps, dans toutes les régions du Québec.

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 obtenue 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, au final, une carrière scientifique.

## 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 – ou même sous-microscopiques – 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.

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 la matière du 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.).

### Difficultés d’apprentissage

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).

Ensuite, la chimie, comme les autres disciplines scientifiques, demande une bonne dose d’abstraction. En effet, les principes explicatifs du comportement de la matière visible sont constitués en modèles qui reposent bien souvent sur la nature corpusculaire, donc invisible, de la matière. Les connaissances qui nécessitent un effort d’abstraction, comme d’imaginer les atomes et les molécules, relèvent du savoir opérationnel. C’est un type de savoir plus difficile à appréhender que le savoir déclaratif, c’est-à-dire des connaissances qui s’énoncent (par exemple, « le sodium est un métal mou qui réagit avec l’eau »). Le savoir opérationnel comprend des connaissances déclaratives, mais celles-ci y sont articulées dans un discours explicatif basé sur des concepts abstraits (décrire la taille relative des ions et des molécules d’eau dans une solution saline nécessite de recourir au savoir opérationnel (Herron, 1996). En fait, ce savoir opérationnalise les connaissances déclaratives. C’est pourquoi certains étudiants croient « comprendre » la chimie, mais ne témoignent pas d’une compréhension en profondeur lorsqu’on les interroge, car ils se sont contentés d’apprendre des connaissances déclaratives. Dans certains contextes, ils s’en sortent bien, par exemple lorsque les examens évaluent des connaissances déclaratives. N’en

demeure pas moins qu'en tant qu'enseignants, nous sommes à même de juger que ces étudiants ont moins bien compris le contenu, parce que la compréhension de la chimie passe aussi par la maîtrise du savoir opérationnel.

La troisième catégorie est celle du savoir procédural, c'est-à-dire le savoir qu'on doit mettre en œuvre pour résoudre un problème, pour appliquer une procédure. Les difficultés des étudiants avec ce type de savoir relèvent souvent des blocages mathématiques mentionnés précédemment, mais ce n'est pas toujours le cas. Si certains problèmes de chimie peuvent paraître très mathématisés au premier abord, ils ne nécessitent généralement qu'une algèbre de base, bien moins complexe que ce que les étudiants accomplissent dans leurs cours de mathématiques. La contextualisation d'un problème de chimie mathématisé rend le problème plus touffu, et c'est le plus souvent ce sur quoi butent les étudiants.

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 faits, des lois, des modèles. Ces énoncés peuvent avoir l'air d'une description sans nuances 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, Darot, Ginsburger-Vogel, & Toussaint, 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 al., 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.

### Niveaux de représentation multiples en chimie

Une caractéristique épistémologique de la chimie distingue cette dernière des autres sciences : la présence dans sa structure même de trois niveaux de représentation. Pour illustrer ce qui est entendu par « niveaux de représentation », 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.

Il y a trois niveaux de représentation en chimie : les niveaux **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), 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; Wu, 2003). Ce n'est en effet qu'après avoir maîtrisé ces trois niveaux 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.

Cette idée de trois niveaux de représentation, distincts mais interreliés, est 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). 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 niveaux à différentes échelles.

Taber (2001a), en particulier, souligne ces difficultés. Il indique que les experts, contrairement aux novices, font facilement la distinction entre ces niveaux et ne ressentent pas le besoin de spécifier à quel niveau 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 niveaux de représentation 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).

## Les conceptions alternatives



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 30 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, j'utiliserai la traduction littérale « conceptions alternatives ». 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, j'utiliserai à partir d'ici de façon interchangeable « 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. 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 enfants, 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. Elle est souvent employée pour parler d'idées que les élèves ont construites en réponse à un enseignement formel. 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 al., 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 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.

Un tel cadre alternatif 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 connaissances antérieures 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).

Les conceptions alternatives peuvent constituer un cadre de référence qui semble valide aux étudiants, ces derniers les arrangeant en un tout satisfaisant, parce que cohérent. Elles sont 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 et al., 2008, p. 147). Pour les diagnostiquer, le chercheur doit donc déployer des techniques particulières.

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. Dans la révision de leur théorie, Strike et Posner (1992) précisent que ne devraient être considérées comme des conceptions alternatives que les représentations des étudiants qui sont centrales dans l'organisation de la pensée et de l'apprentissage. À ce titre, leur théorie du changement conceptuel ne s'applique pas à tous les types d'apprentissages, mais seulement à ceux qui concernent le changement de telles conceptions.

Dans le cadre de la recherche présentée ici, mon utilisation du terme « conceptions » inclut toutefois également les conceptions qui diffèrent de la théorie scientifique acceptée sans être nécessairement fondatrices et organisatrices de la pensée. Ainsi, certaines conceptions sont plutôt des concepts scientifiques parcellaires dans l'esprit des étudiants, ou encore l'agencement de morceaux de théorie pouvant engendrer à une certaine confusion. L'enseignant

doit détecter toutes ces conceptions et y remédier dans l'enseignement. Si plusieurs types de conceptions peuvent exister, il est possible que les stratégies de changement conceptuel soient variées elles aussi. Ainsi, Strike et Posner (1992) proposent une théorie du changement conceptuel pour les conceptions « lourdes », mais il existe d'autres façons de l'appréhender. D'ailleurs, leur posture n'étant pas de proposer des stratégies d'enseignement pour venir à bout des conceptions, mais plutôt une théorie épistémologique du changement conceptuel, il est normal que mes préoccupations de mise en pratique en classe de telles stratégies me fassent prendre un certain recul par rapport à leur définition des conceptions alternatives.

C'est l'apparent paradoxe mentionné précédemment, que j'ai observé dans ma propre pratique d'enseignement, 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, la théorie de la géométrie moléculaire et les théories qui y sont liées? 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 al., 2008, p. 155).

### L'origine des conceptions alternatives

Les conceptions alternatives peuvent ainsi constituer un obstacle à l'apprentissage. 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 simplement un manque de contenu ou d'organisation dans les structures cognitives des étudiants, ceux des deux dernières sont potentiellement 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 pédagogiques<sup>1</sup>, 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).

Levy Nahum et ses collaborateurs (Levy Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein, & Taber, 2010) ont d'ailleurs 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.

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 al., 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 en lien avec 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).

---

<sup>1</sup> Il est à noter que j'ai traduit le terme *pedagogic* utilisé par Taber 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.

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.

### 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.

Sur le concept de la géométrie moléculaire, les principales recherches qui ont tenté d'examiner les conceptions des étudiants sont celles de Furió, Calatayud et leurs collaborateurs (Furió & Calatayud, 1996; Furió, Calatayud, Barcenás, & Padilla, 2000). À l'aide d'un questionnaire à choix multiples, ils ont cherché à déterminer les formes moléculaires les plus difficiles à prédire par la théorie de la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV) pour les étudiants. Ils ont aussi proposé des biais cognitifs qui pourraient expliquer ces difficultés. Ces biais contraignent le raisonnement dans différentes situations, pas uniquement en sciences, et pourraient expliquer l'origine de certaines conceptions alternatives, tout en fournissant un levier sur lequel appuyer les stratégies de changement conceptuel.

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) ou encore entre les conceptions sur l'énergie des liaisons et celles sur la liaison chimique (Boo, 1998), mais aucune n'a porté 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 probablement avoir un impact négatif sur l'apprentissage de notions plus avancées.

### Nécessité de faire une pause dans l'inventaire

Reinders Duit invitait récemment la communauté de recherche à faire une pause dans l'inventaire des conceptions alternatives, entrepris dans les années 1970, pour déterminer comment 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 al., 1994) – comme l'expérience quotidienne avec les phénomènes scientifiques, l'enseignement, le langage –, la recherche se concentre souvent sur la reconnaissance de celles-ci plutôt que sur 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.

### Quelle taxonomie développer?

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 et al., 2000; García Franco & Taber, 2009; Talanquer, 2006).

Talanquer (2006) a ainsi proposé un cadre interprétatif intéressant pour la foule de conceptions alternatives en chimie trouvées dans les dernières années. Lui aussi se situe en porte-à-faux par rapport à la définition des conceptions



alternatives de Strike et Posner, qui, rappelons-le, ne considèrent comme conceptions alternatives que les idées centrales organisant la pensée des étudiants.

Talanquer considère plutôt que toutes les difficultés, qu'elles soient *misconceptions*, *naive beliefs*, « présumés 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 conceptions alternatives 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; or les conceptions alternatives peuvent teinter à la fois le raisonnement et les connaissances. Il semble donc utile de distinguer les conceptions les unes des autres pour produire un cadre explicatif qui en tiendrait en compte tous les types.

D'autres chercheurs en didactique de la chimie ont enjoint leurs collègues à chercher les origines des conceptions. 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. 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 démuni 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.

Duis (2011), dans un article sur les conceptions alternatives en chimie organique, pointe vers une 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 les regrouper selon des caractéristiques qui permettraient d'améliorer l'enseignement pour tous.

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

## L'apprentissage est le changement conceptuel

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 et tente d'y remédier) 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 la remédiation des conceptions soit plus efficace pour réaliser un apprentissage qu'un enseignement traditionnel en sciences.

La prise en compte didactique (Astolfi et al., 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 a comme finalité de remédier aux conceptions alternatives 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 al., 1982; Treagust, 1988). Autrement dit, avant d'envisager de remédier aux 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. Les différentes modalités du changement conceptuel, qui peuvent être très variées, et les choix épistémologiques sur lesquels repose l'étude présentée ici, seront détaillés dans le chapitre 4, « Cadre conceptuel ».

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 al., 2008). Modifier ces conceptions à travers une approche visant le changement conceptuel permettra, 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 al., 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 al., 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).

L'apprentissage est donc vu, à travers le cadre de la didactique, comme la résolution des obstacles liés aux conceptions dans l'esprit des étudiants. Ainsi, l'apprentissage se définit comme l'atteinte du changement conceptuel.

### Pertinence de la recherche

Comme on l'a vu 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 diverses conceptions (Grayson, Anderson, & Crossley, 2001) ou le degré d'exactitude d'une réponse partiellement correcte (García Franco & Taber, 2009), mais aucune n'a jusqu'à maintenant tenté de classifier les conceptions alternatives en chimie selon les erreurs de raisonnement qui peuvent les expliquer.

De plus, il n'existe pas un inventaire des conceptions les plus fréquentes en chimie pour les étudiants québécois. Notre système d'éducation postsecondaire représentant un contexte unique, une étude des difficultés particulières de nos étudiants est nécessaire pour tracer un portrait juste de la situation.

On ne trouve pas non plus, dans les écrits scientifiques, d'outil diagnostique en français pour les conceptions alternatives en chimie. Un tel outil, s'il était en plus facile à utiliser et qu'il générerait des résultats aisément interprétables par les enseignants, pourrait être un atout pour l'enseignement de la chimie au collégial.



## 2. Objectifs de la recherche

Afin de répondre à ces manques dans la recherche actuelle, la présente étude visait cinq objectifs principaux :

1. Explorer les conceptions alternatives d'étudiants de cégep en chimie, plus particulièrement sur la géométrie moléculaire, la polarité et les phénomènes macroscopiques.
2. Concevoir un outil diagnostique pour déterminer et mesurer les conceptions alternatives en chimie des étudiants de Sciences de la nature.
3. Établir les conceptions alternatives les plus fréquentes chez les étudiants de cette population.
4. Évaluer l'impact des conceptions alternatives en géométrie moléculaire et sur la polarité des composés pour la prédiction juste des propriétés macroscopiques de la matière.
5. Proposer une typologie des modes de raisonnement menant à des conceptions alternatives en chimie.

Cette étude s'est déroulée en trois phases : la phase préliminaire, la phase pilote et la phase principale. Chaque objectif est associé à une des phases de l'étude. Il sera question plus en détail de ces trois phases dans les parties 5, « Méthodologie », et 6, « Résultats ».

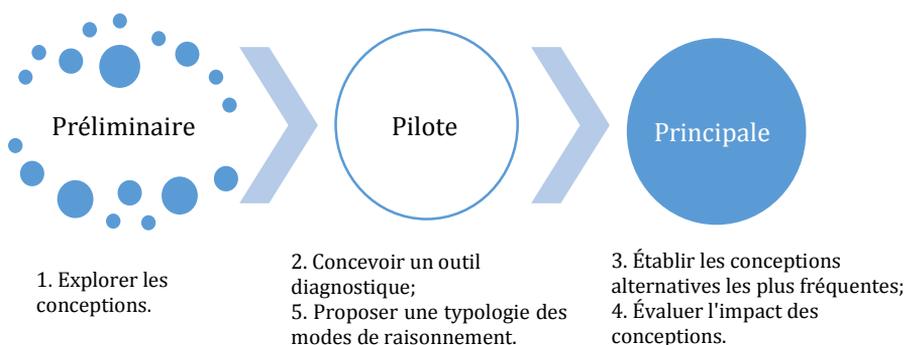


FIGURE 1 : RÉSUMÉ SCHÉMATIQUE DES OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'objectif 1, portant sur l'exploration des conceptions, visait à répondre à la question de recherche « Quelles conceptions alternatives répertoriées par les écrits scientifiques sont présentes dans l'esprit d'étudiants collégiaux? ». Dans la poursuite de ce même objectif, d'autres conceptions alternatives ont aussi été observées, qui n'avaient pas été répertoriées dans les écrits. En lien avec l'objectif 2, j'ai conçu un outil de mesure pour systématiser l'étude des conceptions des étudiants, à la fois celles qui avaient déjà été répertoriées et

celles qui étaient originales. Pour mener à bien l'objectif 3, j'ai utilisé l'outil développé pour répondre à la question « Quelles sont les conceptions alternatives les plus fréquentes en chimie chez les étudiants collégiaux? ». Pour l'objectif 4, les mesures prises par l'outil diagnostique étaient également utilisées, cette fois-ci afin d'évaluer l'impact des conceptions sur la compréhension des autres notions de chimie, répondant à la question « Comment la présence de conceptions sur un sujet peut avoir un impact sur l'habileté à répondre à une question sur un autre sujet? ». Enfin, la question « Quels sont les modes de raisonnement qui mènent à des conceptions alternatives dans l'esprit des étudiants? » sous-tendait l'objectif 5, pour atteindre lequel les résultats de la phase pilote, obtenus lors de l'élaboration de l'outil diagnostique, étaient réutilisés.

### Retombées de la recherche

Les produits de cette étude sont l'outil diagnostique (annexe 2), l'inventaire des conceptions alternatives (annexe 3) et la typologie des modes de raisonnement (annexe 4).

## 3. Notions de chimie

### Grandes idées dans l'enseignement de la chimie

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 présente étude s'est penchée sur les trois premiers, plus précisément sur la notion de molécule, sur la forme et la polarité des molécules et sur les liaisons intermoléculaires (par contraste avec les liaisons intramoléculaires). Ces trois modèles sous-microscopiques de la chimie permettent d'expliquer et de prédire le comportement de la matière au niveau des propriétés observables, notamment en ce qui a trait à l'état de la matière, à la solubilité des composés et à l'apparence des solides.

Dans une perspective d'analyse didactique du contenu de chimie visé par cette étude, je commencerai par définir ces concepts de base. Cette brève introduction à la chimie descriptive permettra au lecteur moins accoutumé à ces contenus de comprendre la suite du rapport. Une carte conceptuelle est également présentée à l'annexe 1.

### Analyse didactique du contenu

#### Le comportement et la structure de la matière

La matière est tout ce qui, dans notre environnement, a une masse. Les solides et les liquides, comme les gaz, ont une masse. Il s'agit là des trois états de la matière. 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 de nous, 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 nos 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 sous nos yeux 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. Cette attraction diffère selon la nature des particules.

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 autour de nous. Pensons seulement à tous les médicaments, à toutes les variétés de roches, à tous les alliages métalliques, à tous les plastiques, à toutes les nuances de couleurs, à 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 autour de nous. 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, composé de 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. Je présenterai d'abord comment sont constituées les substances pures, puis j'illustrerai la distinction entre plusieurs significations d'un terme important, le terme « polarité », et je terminerai cette section en utilisant ces modèles pour expliquer la nature macroscopique de la matière.

## Substances pures : quatre catégories au niveau macroscopique

Les substances pures peuvent être classées dans l'une des quatre catégories du tableau qui suit<sup>2</sup>. Chacune des catégories est ensuite détaillée et illustrée d'exemples et de contre-exemples.

TABLEAU 1 : CATÉGORIES DE SUBSTANCES PURES

Catégories de substances	Organisation sous-microscopique	Constituants de base de la substance	Liaisons 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	-

### Définition de composé moléculaire

Un composé moléculaire est une substance pure formée par un regroupement de molécules s'attirant entre elles par des liaisons intermoléculaires. D'intensité variable, celles-ci sont des liaisons faibles. Plus de détails sur les liaisons intermoléculaires seront présentés à la section « Polarité », à la suite.

- Exemples : l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), le sucre ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), le polyéthylène ( $[\text{CH}_2\text{-CH}_2]_n$ ), l'oxygène ( $\text{O}_2$ ).
- Contre-exemples : le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), un composé ionique; le verre ( $\text{SiO}_2$ ), un solide covalent; le sodium métallique ( $\text{Na}_{(s)}$ ), un métal.

### Définition de composé ionique

Un composé ionique est une substance pure formée par un regroupement d'ions positifs et négatifs reliés entre eux par des liaisons ioniques et formant une structure continue (ou réseau cristallin continu). Le composé ionique est formé d'une même proportion de charges négatives et de charges positives, donnant une charge nette nulle à l'ensemble.

<sup>2</sup> J'ai délibérément mis de côté les cas limites qui ne font pas partie de notre environnement proximal : les complexes organométalliques, les sels en phase gazeuse, 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 ions de charge opposée s'attirent fortement entre eux. Ils se placent pour former une structure tridimensionnelle où chaque ion positif peut attirer plusieurs ions négatifs autour de lui, et où chaque ion négatif peut en retour attirer plusieurs ions positifs. C'est parce qu'ils s'attirent ainsi entre eux dans toutes les directions de l'espace que ces ions forment une structure continue, où les ions positifs alternent avec les ions négatifs. On appelle liaisons ioniques ces attractions électrostatiques fortes entre les ions positifs et les ions négatifs. Comme les liaisons ioniques sont fortes, les ions ne bougent pas beaucoup dans la structure. Ils vibrent un peu sur place, mais ne se déplacent pas les uns par rapport aux autres.

- Exemples : le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), la rouille, soit l'oxyde de fer (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), le phosphate d'ammonium ( $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ ).
- Contre-exemples : l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ), puisqu'un ion seul a une charge formelle, mais la charge formelle d'un composé ionique est nulle; la molécule d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), un composé moléculaire; le verre ( $\text{SiO}_2$ ) et le graphite ( $\text{C}_{(s)}$ ) deux solides covalents.

### Définition de solide covalent

Un solide covalent est une substance pure formée par un regroupement d'atomes reliés entre eux par des liaisons covalentes et formant un réseau, cristallin ou amorphe, continu. Les atomes d'un solide covalent sont le plus souvent des non-métaux. Les liaisons covalentes seront présentées en détail plus loin, mais pour l'instant, il est suffisant de comprendre que ce sont des liaisons chimiques entre les atomes, dont la force est du même ordre de grandeur que celle des liaisons ioniques.

- Exemples : le verre ( $\text{SiO}_2$ ), le graphite ( $\text{C}_{(s)}$ ), le nitrure de bore (BN).
- Contre-exemples : le sucre ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), un composé moléculaire; le polyéthylène ( $[\text{CH}_2\text{CH}_2]_n$ ), un composé moléculaire polymérique mais fini; la rouille, soit l'oxyde de fer (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), un composé ionique.

### Définition de métal

Un métal est une substance pure formée par un regroupement d'atomes métalliques reliés entre eux par des liaisons métalliques dans un réseau continu. L'organisation de la matière dans un métal fait en sorte que les cœurs positifs des atomes sont fixes et forment le réseau alors que les électrons de valence sont délocalisés à travers toute la structure. Les liaisons dans un métal sont des liaisons métalliques.

- Exemples : le sodium métallique ( $\text{Na}_{(s)}$ ), le magnésium métallique ( $\text{Mg}_{(s)}$ ), le fer métallique ( $\text{Fe}_{(s)}$ ), le mercure métallique ( $\text{Hg}_{(l)}$ ), le calcium métallique ( $\text{Ca}_{(s)}$ ).

- Contre-exemples : les ions sodium ( $\text{Na}^+$ ), les ions magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), les ions ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ) et les ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ), qui ont tous une charge formelle; le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) et la rouille, soit l'oxyde de fer (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), des composés ioniques.

Dans les solides covalents et les métaux, il n'y a pas de niveau d'organisation intermédiaire : les atomes sont l'unité de base de ces substances. Dans les composés moléculaires et les composés ioniques, par contre, pour lesquels je propose l'appellation de « constituants de base ». Voici les définitions de ces sous-structures, soit les molécules et les ions.

### Définition de molécule

Une molécule est une entité discrète (par opposition à « continue ») sous-microscopique de matière formée d'un regroupement d'atomes et ayant une charge nette nulle. Selon certaines définitions, sont aussi considérées comme molécules les entités sous-microscopiques discrètes formées d'un seul atome et ayant une charge nette nulle. Les liaisons entre les atomes d'une molécule sont des liaisons covalentes. Les atomes d'une molécule sont le plus souvent des non-métaux.

- Exemples : la molécule d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), la molécule de sucre ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), la molécule d'un polymère plastique comme le polyéthylène ( $[\text{CH}_2\text{CH}_2]_n$ ), la molécule d'oxygène ( $\text{O}_2$ ).
- Contre-exemples : les ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), qui ont une charge formelle; le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), un composé ionique; le graphite ( $\text{C}_{(s)}$ ) et le verre ( $\text{SiO}_2$ ), des solides covalents.

### Définition d'ion

Un ion est une entité discrète sous-microscopique de matière formée d'un atome ou d'un regroupement d'atomes et ayant une charge nette non nulle, positive ou négative. Les ions positifs, appelés cations, sont le plus souvent métalliques. Les ions négatifs, appelés anions, sont le plus souvent non-métalliques. Lorsqu'il est constitué de plus d'un atome, un ion est qualifié de « polyatomique ». Dans ce cas, les liaisons entre ses atomes sont des liaisons covalentes. Les ions sont chargés parce qu'il y a déséquilibre entre les charges positives et négatives qui les constituent.

- Exemples : l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ), l'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), l'ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), l'ion magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), l'ion phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).
- Contre-exemples : le sodium métallique ( $\text{Na}_{(s)}$ ), le chlore ( $\text{Cl}_2$ ), l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), qui n'ont pas de charge formelle.

## 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, comme dans les aimants. 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.

On peut remarquer que la liaison covalente est présente à différents niveaux d'organisation de la matière : entre les atomes des molécules, entre les atomes des ions polyatomiques, entre les atomes des solides covalents. Comme on l'a vu, la liaison covalente est une liaison forte entre des atomes; ainsi, elle ne se brise pas lors du changement de phase des composés moléculaires et ioniques.

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, que les électrons sont partagés entre les deux atomes. 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.

Comme je l'ai expliqué précédemment, la liaison ionique se produit quant à elle entre les ions des composés ioniques. Plus les ions ont une charge élevée, plus ils font des liaisons ioniques fortes avec des ions de charge opposée. De même, plus la taille d'un ion est petite, plus les liaisons ioniques qu'il fait sont fortes. C'est la concentration de la charge qui fait l'intensité des liaisons : une charge très concentrée dans un petit volume attire plus fortement les charges opposées qu'une charge diluée dans un grand volume.

Les molécules sont des particules constituantes de la substance dont la charge nette est nulle. Parce qu'elles n'ont pas de charge formelle, elles font avec leurs voisines des liaisons beaucoup plus faibles que les ions, mais elles en font quand même. Autrement dit, les liaisons intermoléculaires existent, mais elles sont de faible intensité.

## La polarité : équivoque à trois niveaux

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.

### 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 à quel niveau de représentation on situe notre 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.

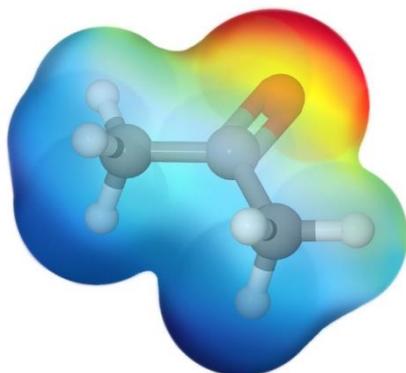
Le caractère polaire d'un solvant ne peut pas s'expliquer au niveau macroscopique. On observe expérimentalement que certains liquides se mélangent ensemble, mais c'est à partir des structures des molécules formant ces liquides qu'on peut expliquer ce qui fait que l'un est polaire et l'autre, non polaire. Les termes polaire et non polaire réfèrent d'ailleurs directement à une caractéristique des molécules, que nous verrons immédiatement.

### 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 niveau sous-microscopique au niveau 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 2 : REPRÉSENTATION DE LA SURFACE ÉLECTROSTATIQUE DE L'ACÉTONE, UNE MOLÉCULE POLAIRE



### Liaisons polaires

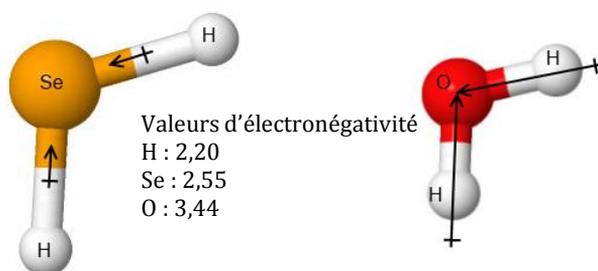
Les molécules sont polaires si elles sont constituées de façon à ce qu'il y ait possibilité d'une séparation de charges. Or, les électrons ne se localisent pas dans un coin de la molécule sans raison : ils se polarisent près des atomes qui les attirent le plus fortement. La propension d'un atome à attirer 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.

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.

Pour chaque liaison dans laquelle les atomes ont une valeur d'électronégativité différente, ceux-ci subissent une séparation de charge et possèdent donc un moment dipolaire électrique non nul. S'il n'y a pas de séparation de charge, le moment dipolaire est nul. La liaison qui possède un moment dipolaire non nul est polaire; celle qui a un moment dipolaire nul est non polaire. 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 électronégatif<sup>3</sup>. Sa magnitude est proportionnelle à la différence d'électronégativité entre les atomes. Comme illustré sur les molécules de la figure suivante, 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 3 : VECTEURS DE POLARITÉ DES LIAISONS DES MOLÉCULES DE SÉLÉNIURE D'HYDROGÈNE ( $\text{H}_2\text{Se}$ )



ET D'OXYDE D'HYDROGÈNE ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Comme représenté à la figure 3, les liaisons H-Se de la molécule de gauche sont non polaires parce que la différence d'électronégativité est plus petite que 0,5 (elle est de 0,35). Les liaisons H-O de la molécule de droite sont polaires parce que la différence d'électronégativité est plus grande que 0,5 (elle est de 1,24). Les vecteurs sont dessinés pour représenter le sens, la direction et la magnitude des moments dipolaires des liaisons, cette dernière étant évoquée par la longueur de la flèche barrée. Il est à noter que les vecteurs H-Se sont dessinés, mais, comme expliqué précédemment, qu'ils sont de magnitude négligeable.

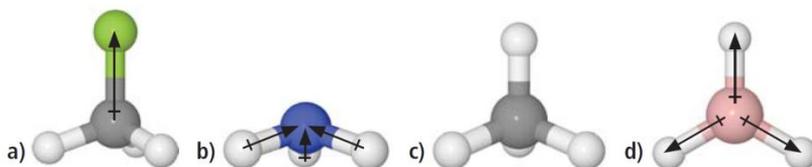
### Prediction de la polarité d'une molécule : vecteurs de polarité et addition vectorielle

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 2, 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

<sup>3</sup> 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 nos étudiants quelle convention est utilisée pour éviter de les confondre.

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 4 : 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. 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.

### 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.

## Nature sous-microscopique pour expliquer les phénomènes macroscopiques

### Mise en solution

La polarité des substances est l'une des propriétés de la matière qui s'expliquent par la nature sous-microscopique des particules qui les constituent. La polarité explique une partie de la solubilité des substances. En effet, on a dit qu'une substance polaire est soluble dans un solvant polaire. Mais comment expliquer cette propriété?

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, comme le vinaigre et l'huile, par exemple. Au contraire, l'alcool et l'eau se mélangent : c'est parce que les molécules d'alcool et les molécules d'eau s'attirent entre elles. Ces liaisons intermoléculaires entre molécules différentes sont les mêmes que celles qui existent dans une substance pure composée de molécules identiques. Si les liaisons intermoléculaires sont assez fortes, deux composés différents peuvent se mélanger.

### Liaisons intermoléculaires

Il existe deux classes de liaisons intermoléculaires : les forces de Van der Waals et les liaisons hydrogène. Les forces de Van der Waals sont basées sur la taille des molécules (plus elles sont grosses, plus elles font des liaisons fortes entre elles) et sur leur polarité (plus elles sont polaires, plus elles font des liaisons fortes entre elles). Plus fortes que les liaisons de Van der Waals, les liaisons hydrogène se forment entre des molécules qui possèdent une liaison très polaire à laquelle participe un atome d'hydrogène. Cette liaison est si polaire que l'atome d'hydrogène devient presque partagé avec une autre molécule, qui l'attire parce qu'il est partiellement chargé positivement.

### 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. 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.

### Changement de phase

Si on chauffe de l'eau jusqu'à 100 °C, l'eau se met à bouillir et elle s'évapore. De liquide, elle passe en phase gazeuse. Ce changement de phase se modélise, au niveau 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 de nos congélateurs (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.

### 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 niveau 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 au final 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 saisir parce que ces concepts sont complexes, peu intuitifs et souvent interreliés.



## 4. Cadre conceptuel

La recherche présentée dans ce rapport 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 inédites pour la population visée, à l'aide d'un outil de collecte de données nouveau.

### Les conceptions alternatives répertoriées dans les écrits scientifiques

Afin de cerner les principales difficultés potentielles lors de l'apprentissage de la géométrie moléculaire, soit la forme que prennent les molécules, j'ai effectué un inventaire de la recherche sur les conceptions alternatives, notamment à partir de la bibliographie de Pfundt et Duit (2009). Parmi les conceptions alternatives répertoriées dans les écrits scientifiques, j'aborderai ici celles relatives aux concepts reliés à de la géométrie moléculaire, soit la nature corpusculaire de la matière, la liaison chimique et les phénomènes macroscopiques.

#### Nature corpusculaire de la matière

Comme on l'a vu dans les « Notions de chimie », 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.

### La discontinuité de la matière

L'idée de matière se développe tôt chez les enfants (Krnell, 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<sup>e</sup> année. Toutefois, dans une étude auprès d'élèves de 14-15 ans dans le cadre de laquelle on leur demandait de représenter l'air au niveau 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 niveau 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 al., 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 al., 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 al., 1993) ou même la disparition pure et simple de la matière (Ayas et al., 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.

### 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 al., 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 al., 2010; Griffiths & Preston, 1992; Lee et al., 1993). De la même façon, des élèves expliquent le refroidissement d'une substance par le fait que les molécules deviennent plus froides (Lee et al., 1993). Ce type d'explication pseudomoléculaire peut donner à penser aux élèves, à tort, qu'ils invoquent correctement le niveau 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 al., 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 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<sup>e</sup> 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.

### Nature des composés

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 al., 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.

### Liaison chimique

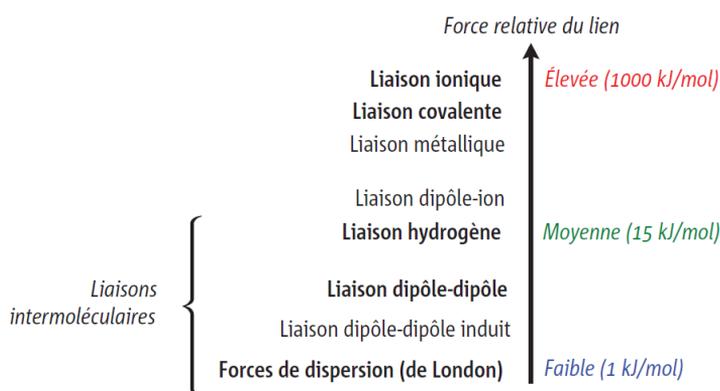
Étant donné les difficultés qu'éprouvent les élèves et les étudiants quant à la nature corpusculaire de la matière, il n'est pas surprenant qu'ils peinent également à comprendre le concept tout juste en amont, soit la liaison chimique (Garnett et al., 1995). S'il y a de nombreuses études sur la détermination 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 classer les liaisons selon une « première approximation » (Taber & 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 5 (Voisard & Cormier, 2013) présente cette échelle d'intensité des liaisons chimiques.

Figure 5 : Continuum de l'intensité relative des liaisons chimiques

### Intensité relative des liaisons



© Les Éditions CEC. Reproduit avec l'autorisation de l'éditeur.

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 al., 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.

### Polarité des liaisons

J'ai 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 al., 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 al., 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 & 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.

### Géométrie moléculaire

La géométrie moléculaire, comme je l'ai mentionné précédemment, 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.

### 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 & 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 & Kurtz, 1999; Nicoll, 2001; Peterson et al., 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.

### Polarité de l'entité moléculaire

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  $\text{CO}_2$ , 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<sup>e</sup> 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 & 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, à la lumière de mon expérience, 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).

### 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 en lien avec la difficile relation à établir entre les causes modélisées au niveau sous-microscopique et les conséquences observées au niveau macroscopique.

### Liaisons intermoléculaires<sup>4</sup>

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 al., 2001; Schmidt, 1996).

Ainsi, certains étudiants croyaient que toute liaison covalente mettant en jeu un atome d'hydrogène était une liaison hydrogène, confusion vraisemblablement

---

<sup>4</sup> À strictement parler, les liaisons intermoléculaires auraient pu trouver leur place à la section « Liaison chimique ». Toutefois, puisqu'elles s'exercent entre les molécules et qu'elles sont influencées par la géométrie moléculaire et la polarité des molécules, j'ai choisi de présenter ici les conceptions sur ce sujet.

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 al., 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.

### Polarité des substances

Pour faire suite à la polarité des liaisons et à la polarité des molécules, cette sous-section traitera de la polarité des substances, au niveau 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 & 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 niveaux de représentation macroscopique et sous-microscopique (Taber, 2001a).

### Changement de phase

On a rapporté que les étudiants ont de la difficulté à prédire le point d'ébullition de composés organiques simples (Butts & 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 al., 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 & Smith, 1987; Henderleiter et al., 2001; Mulford & Robinson, 2002; Osborne & Cosgrove, 1983; Othman et al., 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 al., 2010).

## Le raisonnement logique en sciences

Les conceptions alternatives tirent leur origine de différentes sources : des observations naïves du monde naturel, de la représentation des concepts scientifiques dans les médias, de l'enseignement lui-même, pour n'en nommer que quelques-unes (Wandersee et al., 1994). Mais elles proviennent surtout de l'interprétation et la reconstruction des concepts dans l'esprit des étudiants. Pour que les concepts scientifiques y prennent leur place, les structures cognitives doivent les accommoder en leur trouvant un sens. Les conceptions alternatives sont les constructions mentales qu'ont faites les étudiants en s'expliquant à eux-mêmes, délibérément ou non, les nouveaux concepts. Les mécanismes et les contraintes cognitives qui sous-tendent cette activité permettent d'expliquer les conceptions alternatives, et aussi de les classer pour y remédier de façon différenciée. On abordera donc dans cette section les modes de raisonnement en sciences qu'un certain nombre d'équipes de recherche ont étudiés sous l'angle du raisonnement logique et de l'application d'heuristiques.

## Propositions logiques

Le discours scientifique prend la forme de propositions logiques, des énoncés propositionnels qui constituent en réalité des définitions s'emboîtant les uns 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 (Astolfi et al., 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 (Pallrand, VanHarlingen, Lockwood, Martin, & Piburn, 1981).

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 (Roadrangka, 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 habiletés de raisonnement logique sont ainsi essentielles à la maîtrise des concepts et à l'utilisation adéquate des stratégies de résolution de problèmes complexes en chimie générale.

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).

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. La section suivante présentera les recherches les plus pertinentes à ce sujet.

### Raisonnement logique et conceptions alternatives

Comme je l'ai 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 al., 2008), d'autres ont plutôt cherché à les catégoriser selon leur origine cognitive. Ce faisant, on viserait la racine cognitive des conceptions alternatives et, d'une pierre deux coups, on pourrait classifier les conceptions et fournir aux enseignants un levier pour aborder le changement conceptuel.

Un champ de recherche en particulier 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).

Dans la vie de tous les jours, nous prenons des décisions en nous basant sur des processus simples à appliquer. Rares sont les occasions où nous considérons tous les paramètres d'un problème avant de trancher. En effet, certaines contraintes, reliées à nos habitudes, à notre personnalité, à la familiarité de la situation ou à d'autres préférences nous poussent à faire un choix qui semble tomber sous le sens, du moins pour nous-même.

raisonnement complet. C'est pourquoi nous utilisons 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.

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 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 ».

Comme on l'a dit, l'application d'une heuristique pour prendre une décision ou poser un jugement emploie deux éléments : des connaissances fragmentaires intuitives et un raisonnement en raccourci. Les connaissances fragmentaires 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.

### Heuristiques 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. 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 inexactes en chimie.

Talanquer (2006) a ainsi compilé les conceptions alternatives diagnostiquées 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 diagnostiquée comme 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-prim*s, 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-prim*s. 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.

**TABEAU 2 : HEURISTIQUES CONTRAIGNANT LE RAISONNEMENT EN CHIMIE**

<b>Catégories</b>	<b>Heuristiques</b>	<b>Définition de l'heuristique</b>
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	One-reason decision-making	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 excessive	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 chacune des heuristiques, 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 excessive. 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.

À la suite de l'inventaire des recherches qui 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 je l'ai 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.

### L'explication comme tâche cognitive en chimie

L'enseignement traditionnel ne permet pas aux étudiants de développer les habiletés de raisonnement logique pourtant nécessaires pour utiliser certains modèles très abstraits de la chimie. Selon Maeyer et Talanquer (2010), l'utilisation des modèles sous-microscopiques pour faire des inférences ou des prédictions quant au comportement physique ou chimique de la matière est un des sujets nécessitant le plus d'habileté de raisonnement logique. Ils recommandent aux enseignants de demander plus souvent aux étudiants de baser leurs décisions sur des résultats analytiques et de stimuler chez eux la métacognition qui leur permettrait de distinguer une réponse intuitive d'une réponse analytique.

Dans une étude longitudinale menée dans les années 1990, Taber (Taber, 1995, 1998) a interviewé des étudiants à plusieurs reprises durant toute la durée de leurs études secondaires, leur demandant de discuter de différents concepts de chimie. Cette étude lui a permis de proposer un cadre explicatif alternatif pour les conceptions alternatives en chimie. Ce cadre alternatif répertorie que les étudiants voient la liaison chimique comme une dichotomie (ionique ou covalente), que, pour eux, les molécules ioniques sont des structures possibles, et que les liaisons se font et se défont pour respecter la règle de l'octet. Avec son cadre alternatif, Taber avance que ces structures cognitives primitives sont utilisées par les étudiants pour construire des explications et faire des prédictions en chimie, au-delà des conceptions alternatives qui en sont l'expression manifeste. En ce sens, ses conclusions s'inscrivent dans le cadre des recherches de Talanquer sur le raisonnement de sens commun en chimie (2006, 2009).

### *P*-prims en chimie

Une seule étude a cherché à déterminer la présence de *p*-prims dans le raisonnement en chimie (García Franco & 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 niveau sous-microscopique pour expliquer les observations macroscopiques. Seulement 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 al., 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 résulte 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 brasser 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 relation détectable 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 & Taber, 2009).

## Le diagnostic des conceptions alternatives

Au fil des ans, on a proposé plusieurs méthodes de diagnostic des 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 al., 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 pour le diagnostic des conceptions 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.

Peterson et ses collaborateurs proposent plutôt d'utiliser un questionnaire à choix multiples, qu'on aurait conçu précisément pour la détection des conceptions alternatives. Comme celles-ci ne sont souvent pas détectables dans un contexte traditionnel d'enseignement (Driver & Easley, 1978), les questionnaires à choix multiples traditionnels ne sont pas pertinents pour procéder à un tel diagnostic. 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 al., 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 des connaissances 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 le diagnostic des 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 diagnostiquée 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 al., 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 (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 notre contexte.

Voici sommairement les 10 étapes proposées par David Treagust (1988) pour le développement d'un tel questionnaire à deux paliers.

## Définir le contenu

### 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.

### Étape 2 : Développer une carte conceptuelle

Afin de mettre en évidence les relations entre les concepts visés par le questionnaire diagnostique, 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.

### 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.

### 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.

## Obtenir des informations sur les conceptions alternatives des étudiants

### 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 je l'ai présenté précédemment, plusieurs conceptions alternatives en chimie ont déjà été diagnostiquées chez différentes populations étudiantes.

### Étape 6 : Mener des entrevues non structurées 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 entrevues avec des étudiants. Ce type d'entrevue implique que « le chercheur prépare ou établit un schéma d'entrevue 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 entrevues sont les concepts déterminés à l'étape de la carte conceptuelle (étape 2). La méthode de l'entrevue semi-dirigée 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.

### 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  $\text{PF}_3$ ? » 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 entrevues. Ces raisons seront ensuite utilisées pour le deuxième palier de l'outil final (étape 8).

## Développer le test diagnostique

### 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.

### 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.

### Étape 10 : Raffinements continus

Dans une perspective de développement continu, on pourra et on devra améliorer le test diagnostique 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.

## Précaution pour le développement d'items diagnostiques à deux paliers

Quand on développe un outil diagnostique à deux paliers, il faut veiller à ne pas donner dans les justifications (deuxième palier) « d'indice » 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 al. (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.

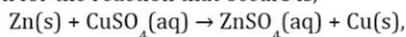
FIGURE 6 : EXEMPLE D'UN ITEM OÙ CHAQUE JUSTIFICATION AU DEUXIÈME PALIER CORRESPOND MANIFESTEMENT À UNE SEULE OPTION DU PREMIER PALIER

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 al. (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  $\text{Cu}^{2+}$  ions have formed insoluble, reddish-brown copper atoms.
- 4 In aqueous solution  $\text{Cu}^{2+}$  ions produce a blue solution, while  $\text{Zn}^{2+}$  ions produce a colourless solution.

FIGURE 7 : 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 du diagnostic de ce type d'outil. J'ai développé dans le cadre de la présente recherche un tel outil, qui sera présenté dans la partie 5, « Méthodologie ».

### 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 expliquent. Le raisonnement de sens commun, lorsqu'il est utilisé pour résoudre des problèmes en sciences, peut entraîner des réponses incorrectes au sens de la théorie scientifique acceptée, ce qui constitue des conceptions alternatives. Mais ces réponses manifestes peuvent se réduire à un nombre plus petit de contraintes cognitives (heuristiques, *p-prims*,

suppositions implicites de base) qui, en fournissant un cadre interprétatif, pourront aider à remédier aux conceptions alternatives.

Le diagnostic des conceptions alternatives est opérationnalisé de différentes façons par les groupes de chercheurs, certaines techniques étant holistiques, mais demandant beaucoup de temps (comme l'entrevue) alors que d'autres donnent peu d'informations sur le raisonnement des étudiants (comme le test à choix multiples). Le questionnaire à choix multiples à deux paliers, présentant au courant de son développement la possibilité de recueillir des justifications naturelles d'étudiants, puis dans son application large, celle de sonder les conceptions alternatives d'un grand nombre d'étudiants, permet de répondre aux questions que pose la présente recherche, notamment : quelles sont les conceptions des étudiants et quels sont leurs modes de raisonnement?

## 5. Méthodologie

Comme l'a précisé la partie 2, « Objectifs de la recherche », du présent rapport, cette recherche en trois phases visait les objectifs suivants : en phase préliminaire, explorer les conceptions; en phase pilote, concevoir un outil diagnostique et proposer une typologie des modes de raisonnement; en phase principale, établir les conceptions alternatives les plus fréquentes et évaluer l'impact des conceptions (voir la figure 8).

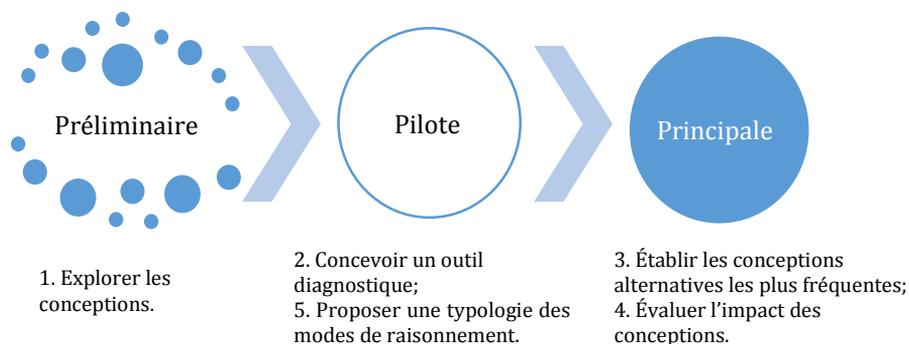


FIGURE 8 : RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA RECHERCHE, SELON LES PHASES DE L'ÉTUDE

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

### Échantillon

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

TABLEAU 3 : 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

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

J'ai choisi les concepts de chimie sur lesquels l'étude a porté 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 4 indique le genre et le rendement scolaire de ces étudiants, en plus de préciser où ils étaient rendus dans leurs études.

**TABEAU 4 : 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	2 <sup>e</sup>	Sciences de la santé
2	F	Moyen	2 <sup>e</sup>	Sciences de la santé
3	M	Fort	2 <sup>e</sup>	Sciences de la santé
4	M	Faible	2 <sup>e</sup>	Sciences pures
5	M	Faible	2 <sup>e</sup>	Sciences pures
6	M	Fort	2 <sup>e</sup>	Sciences pures
7	F	Faible	2 <sup>e</sup>	Sciences de la santé
8	F	Moyen	1 <sup>re</sup>	Pas encore choisi
9	M	Moyen	1 <sup>re</sup>	Pas encore choisi
10	F	Fort	1 <sup>re</sup>	Pas encore choisi
11	F	Faible	1 <sup>re</sup>	Pas encore choisi

Les étudiants ont participé à la recherche sur une base volontaire. Je les ai recrutés moi-même, en les contactant par courriel. Un seul étudiant que j'ai 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.

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

La phase pilote visait à développer le test diagnostique 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 diagnostique en chimie. Les étudiants de cégep constituaient la population visée par les objectifs de la recherche, mais j'ai eu l'occasion de recueillir également des données provenant d'étudiants universitaires.

**TABEAU 5 : DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON POUR LA PHASE PILOTE**

Établissement scolaire	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	1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup>
Cégep Marie-Victorin	19	4	Sciences de la nature	2 <sup>e</sup>
Cégep de Saint-Jérôme	26	13	Sciences de la nature	1 <sup>re</sup>
Cégep de Sorel-Tracy	24	19	Sciences de la nature	1 <sup>re</sup>
Université de Sherbrooke	7	14	Baccalauréat en chimie	1 <sup>re</sup>
Université de Montréal	9	2	Baccalauréat en enseignement des sciences au secondaire	2 <sup>e</sup>

J'ai sélectionné ces étudiants de niveau collégial 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). J'ai procédé à la collecte de données de cette phase aux trimestres d'hiver 2011, d'automne 2011 et d'hiver 2012.

### 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. J'ai déterminé cette condition 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 c'étaient les conceptions alternatives dues à la reconstruction personnelle par les étudiants de concepts déjà étudiés en classe que je souhaitais découvrir.

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), j'ai 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, j'ai contacté par courriel le coordonnateur 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. 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 améliorerait la généralisabilité des résultats à toutes les régions du Québec.

Pour cette phase de la recherche, 2125 étudiants de 24 établissements<sup>5</sup> ont répondu au questionnaire en ligne. L'échantillon de cette phase est présenté au tableau 6.

<sup>5</sup> 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.

**TABLEAU 6 : ÉCHANTILLON D'ÉTUDIANTS AYANT PARTICIPÉ À LA PHASE PRINCIPALE DU PROJET, SELON LEUR ÉTABLISSEMENT D'ENSEIGNEMENT**

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

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.

## Outils de collecte de données

### Phase préliminaire : entrevues

J'ai mené les entrevues préalablement au début du projet de recherche comme tel. 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'isomérie. Il s'agissait d'entrevues cliniques : je proposais des tâches 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, je demandais aux étudiants de 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.

Je demandais ensuite aux participants, comme deuxième tâche, de dessiner la structure de Lewis du chlorure de thionyle ( $\text{SOCl}_2$ ) puis d'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 ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). Comme je souhaitais étudier les conceptions sur la tridimensionnalité des molécules, j'ai choisi une molécule qui, 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  $\text{SOCl}_2$  devaient, à la place, faire la structure de Lewis et construire un modèle de l'ion ammonium,  $\text{NH}_4^+$ , dont la géométrie est tétraédrique.

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, j'ai également pris une photographie de la construction en pâte à modeler de chaque étudiant.

### 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 diagnostique à deux paliers. Les numéros d'étapes qui suivent reprennent ceux que j'ai présentés précédemment dans la partie 4, « Cadre conceptuel », et réfèrent à cette méthode.

Pour les étapes 1 à 4 (déterminer les énoncés propositionnels, développer une carte conceptuelle, relier les énoncés et la carte, et valider le contenu), j'ai réalisé l'analyse didactique du concept de géométrie moléculaire pour déterminer les concepts qui sont reliés à son apprentissage, en amont et en aval. Pour déterminer ces concepts, j'ai utilisé comme première source les énoncés de compétence du programme collégial de sciences de la nature du Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie

(MESRST), qui s'appelait à l'époque le Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS). 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.

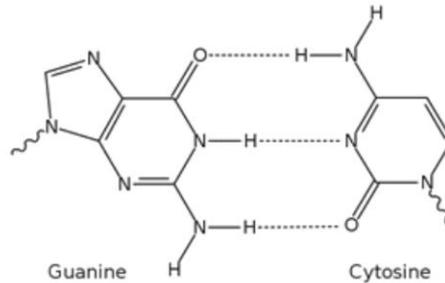
Concomitamment, j'ai utilisé les manuels offerts sur le marché québécois pour le cours Chimie générale 202-NYA comme base pour l'analyse didactique du concept de géométrie moléculaire. Je me suis servie de tous les livres les plus communément utilisés par les enseignants de chimie générale et leurs étudiants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

J'ai dressé une liste d'énoncés propositionnels afin de cerner le contenu qui ferait partie du questionnaire à deux paliers. En parallèle, j'ai élaboré une carte conceptuelle (voir l'annexe 1). Individuellement décrits par les énoncés, les concepts se trouvent donc également reliés les uns aux autres. J'ai ensuite fait valider les énoncés propositionnels 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. La partie 3 de ce rapport, « Notions de chimie », présente une adaptation de ces énoncés. Un enseignant de chimie du Cégep André-Laurendeau a validé l'exactitude de son contenu.

Les étapes 5 à 7 visent à obtenir des informations sur les conceptions des étudiants. L'inventaire des conceptions alternatives présenté à la partie 4 de ce rapport, « Cadre conceptuel », témoigne de l'examen des écrits scientifiques auquel j'ai procédé 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 que je nomme 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

J'ai préparé soixante items à choix multiples à partir des conceptions répertoriées dans les écrits scientifiques, de mes résultats à l'étape préliminaire et de mon expérience d'enseignement. Vingt items étaient adaptés de recherches antérieures (Ayas et al., 2010; Ben-Zvi et al., 1986; Furió & Calatayud, 1996; Mulford & Robinson, 2002; Peterson et al., 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 études antérieures avaient abordés.

Pour la passation aux groupes d'étudiants, j'ai préparé neuf versions d'outils comportant chacune 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.

J'ai présenté moi-même les buts de la recherche à tous ces étudiants, le jour où ils ont répondu au questionnaire, au cégep ou à l'université où ils étudiaient. Le

professeur était présent ou non pendant le déroulement du test, dont j'assurais la supervision. J'ai remis aux étudiants 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 je les invitais à détacher et à conserver s'ils acceptaient de participer à l'étude. Je distribuais aussi à chaque étudiant un tableau périodique simplifié (comportant le nom des éléments, leur numéro atomique, leur masse atomique et leur électronégativité) que je récupérais lorsqu'ils remettaient leur questionnaire rempli. La durée maximale pour répondre au test était de 30 minutes.

**Phase principale : questionnaire diagnostique à deux paliers sur ConSOL**  
L'étape suivante 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 ont 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.

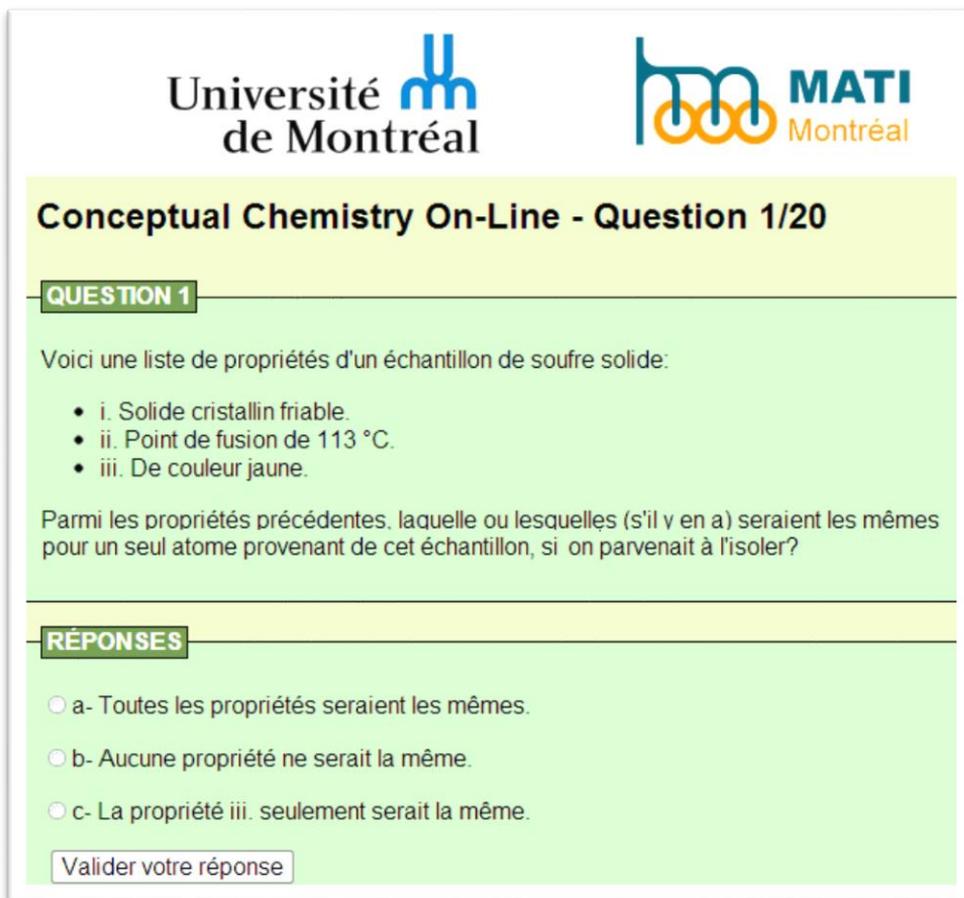
Considérant les limites de cette méthode, que j'ai présentées précédemment (partie 4, « Cadre conceptuel »), soit que des indices peuvent être présents dans les justifications et que les étudiants peuvent consulter avant de répondre au premier palier, et que pour contrer cette limite certains items présentent des justifications qui ne sont pas les raisons qu'invoqueraient naturellement les étudiants, j'ai opté pour une manière différente de celle employée habituellement avec ce genre d'outil pour faire passer les tests à deux paliers : plutôt qu'un test sur papier, la phase principale a utilisé un test sur plateforme Web.

La plateforme ConSOL (pour *Conceptual Science On-Line*) 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 al., 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.



The screenshot displays the interface of the ConSOL platform. At the top, the logos for 'Université de Montréal' and 'MATI Montréal' are visible. Below the logos, a yellow banner reads 'Conceptual Chemistry On-Line - Question 1/20'. The main content area is green and contains the following text:

**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.

At the bottom, there is a button labeled 'Valider votre réponse'.

FIGURE 10 : SAISIE D'ÉCRAN DU PREMIER PALIER D'UN ITEM À CHOIX MULTIPLES 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 Web 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, je voulais m'assurer 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 diagnostiquer 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 à deux paliers à choix multiples développé dans le cadre de la présente recherche se nomme « Molécules, polarité et phénomènes ». Il est constitué de 20 questions à choix multiples à deux paliers sur la plateforme ConSOL. Le texte des questions est présenté en annexe 2.

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 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, j'ai envoyé par courriel un document de consignes ainsi qu'un document d'information pour les étudiants. 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 participer<sup>6</sup>, puis accéder à l'adresse URL pour la passation du test<sup>7</sup>. 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.

## Traitement et analyse des données

### Phase préliminaire

Comme je l'ai dit précédemment, les entrevues ont été enregistrées et transcrites. Étant donné les visées exploratoires de cette recherche, j'ai codé les transcriptions selon des catégories émergentes 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, j'ai procédé à l'analyse des données grâce à un logiciel de traitement des données qualitatives, le logiciel QDA Miner (Provalis Research, n.d.).

### Phase pilote

Cette phase de la recherche m'a fourni comme données brutes les questionnaires papier, sur lesquels les justifications des étudiants étaient écrites à la main. Avant de pouvoir les analyser, j'ai recopié ces 2946 justifications dans le logiciel Microsoft Excel, qui présentait l'avantage de permettre de manipuler une grande quantité de données et de trier les résultats rapidement. La saisie de données se faisait après que chaque groupe d'étudiants avait terminé de répondre au questionnaire, pour me permettre d'analyser les données au fur et à mesure de la collecte et d'ajuster les items des questionnaires rapidement si nécessaire. Je saisisais également 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.

---

<sup>6</sup> 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.

<sup>7</sup> Au moment de publier ce rapport, l'URL était <http://www.consolchem.org/version9>. Au cas où ce lien ne fonctionnerait plus, veuillez me contacter pour avoir l'adresse à jour.

Je poursuivais deux objectifs 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 que j'utiliserais lors de la phase principale de l'étude. D'autre part, déterminer quelles erreurs de raisonnement transparaisaient des justifications, à partir des catégories de Talanquer (2006, 2009) et de catégories émergentes.

J'ai réalisé l'analyse des justifications et la production de catégories de raisonnement 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.

La partie 6 de ce rapport, « Résultats », 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, j'ajustais les items puis je les redistribuais dans les versions suivantes s'ils étaient pertinents.

## Phase principale

### 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, j'ai ainsi récupéré les données de tous les répondants au test. Les données étaient nettoyées dans Excel, puis exportées dans le logiciel IBM SPSS (IBM Corp., 2012) pour analyses statistiques.

### Variables indépendantes

Pour chaque participant à la phase principale, le sondage avait 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, je pouvais aussi classer les répondants par groupe-classe. En communiquant par courriel avec les enseignants, je pouvais également connaître le cours auquel les étudiants étaient inscrits au moment de répondre au test. Enfin, grâce aux calendriers scolaires, j'ai aussi créé une variable « Progression dans le programme » qui précisait à quel moment de la session le test se déroulait.

### 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 m'assurer que les répondants au test avaient été le plus sérieux possible, j'ai seulement analysé les questionnaires complets. 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. Je n'ai pas compté les étudiants qui n'ont répondu à aucune question, 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).

### Variables dépendantes

J'ai élaboré plusieurs façons d'attribuer des points aux combinaisons de choix de réponse et de justification. Voici une description de ces variables dépendantes.

Score 1<sup>er</sup> palier – La bonne réponse à la question au premier palier de chaque item valait 1 point, les deux mauvaises réponses valaient 0 point. Le score 1<sup>er</sup> palier est la somme de ces points pour l'ensemble des questions, divisée par 20, qui est le score maximal.

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

Score pondéré – Pour raffiner l'analyse, j'ai développé un système de pointage attribuant aux étudiants un maximum de 5 points par item. Ce système prenait en compte les bonnes réponses avec bonne justification (5 points), mais permettait 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 : $\text{NH}_4\text{Br}$ et $\text{H}_2\text{SO}_4$ . 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 $\text{NH}_4\text{Br}$ est une molécule.	c. Seul le $\text{H}_2\text{SO}_4$ 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). J'ai procédé au même type d'analyse sur les 3 options du premier palier et les 9 justifications du deuxième palier pour les 20 items, afin d'ordonner le plus possible les unes par rapport aux autres les différentes combinaisons de choix de réponse. Cette grille de pointage est présentée dans l'annexe 2, pour chaque combinaison réponse-justification de chaque item. Je l'ai 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 donnait un score sur 100, que j'ai converti en fraction en le divisant par 100.

## 6. Résultats

### 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, j'ai mené des entrevues 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), je ne les reprendrai pas entièrement 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 m'ont rendues étaient le plus souvent vierges.

Une observation reliée aux modèles mentaux des étudiants 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 (qui a en fait un électron non apparié) et a justifié cet ajout en disant : « Parce que je trouvais qu'il faisait triste [sic]. » Un autre étudiant, à qui je demandais pourquoi les atomes se lient entre eux dans une liaison chimique, m'a répondu : « Ils sont bien entre eux, le Cl<sub>2</sub> obéirait à la règle de l'octet, alors il serait tranquille. » Au lieu d'expliquer les phénomènes par des principes chimiques, ces étudiants avaient tendance, arrivés au bout de leurs explications, à recourir à des analogies anthropomorphiques ou téléologiques.

Par ailleurs, j'ai observé un « duo » de conceptions alternatives concernant la prédiction de la forme des molécules, 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 dans la partie 3, « Notions de chimie », cette théorie de la géométrie moléculaire s'appelle la répulsion des paires d'électrons de valence (RPEV). Les deux conceptions alternatives 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 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, qui porte sur la géométrie moléculaire, et la typologie des erreurs de raisonnement que présentera la section suivante.

En cherchant des conceptions alternatives sur la géométrie moléculaire ainsi que des modes de raisonnement permettant de classer celles-ci, j'ai trouvé de très nombreuses autres conceptions, dont il sera question immédiatement. Pour illustrer quelques points particuliers, je présenterai certains autres résultats de la phase préliminaire au fil de la section suivante.

### Phase pilote

Comme je l'ai expliqué dans la méthodologie, j'ai utilisé pour cette phase le questionnaire à deux paliers (pour chaque question, choix multiples et justification ouverte). Dans cette section, je présenterai d'abord uniquement les résultats du premier palier, puis un aperçu de la combinaison réponse-justification pour certains items. Enfin, je conclurai avec la typologie des erreurs de raisonnement que j'ai développée sur la base de ces justifications.

### Taux de succès au premier palier

Au premier palier, le taux de succès moyen était de 38,9 % (écart-type : 18,7 %), ce qui, bien qu'étant faible, se compare à ce que rapportent des études similaires (Furió & Calatayud, 1996; Othman et al., 2008; Peterson et al., 1989; Tan et al., 2002). Le tableau 7 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.

**TABEAU 7 : MOYENNE AU PREMIER PALIER DU TEST À CHOIX MULTIPLES ET JUSTIFICATIONS OUVERTES, SELON LA PROGRESSION DANS LEURS ÉTUDES**

<b>Étudiants inscrits...</b>	<b>Moyenne au 1er palier</b>	<b>N</b>	<b>Écart-type</b>
<b>Total</b>	<b>38,9 %</b>	<b>277</b>	<b>18,7</b>
Au cours Chimie générale	33,1 %	28	14,8
Au cours Chimie des solutions	42,8 %	148	17,3
En 2 <sup>e</sup> année, cégep en Sciences	31,7 %	68	19,8
En 1 <sup>re</sup> année, baccalauréat chimie	56,6 %	21	19,8
En 2 <sup>e</sup> année, baccalauréat enseignement des sciences	33,1 %	12	11,8

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 mesurer des conceptions alternatives. À ce titre, le taux de succès témoigne du fait que, comme je le soupçonnais, les étudiants ont des conceptions alternatives.

La moyenne au premier palier des étudiants en première année au baccalauréat en chimie dépasse significativement celle des autres étudiants (au niveau 0,05). Au collégial, paradoxalement, les étudiants inscrits au cours Chimie des solutions, qui se donne en première année dans le programme Sciences de la nature, ont significativement mieux réussi que les étudiants inscrits en deuxième année du même programme.

Il faut par contre noter que tous les étudiants n'ont pas nécessairement répondu aux mêmes items. Les quatre premières versions de l'outil étaient significativement moins bien réussies par les étudiants que les autres, mais en même temps, seuls des étudiants de deuxième année de Sciences de la nature y ont répondu. Il est donc impossible de déterminer si ces versions étaient plus difficiles que les suivantes ou si ces étudiants de deuxième année étaient moins performants. Lorsque les résultats aux quatre premières versions sont retirés des données, il demeure que les étudiants du baccalauréat en chimie ont une moyenne qui dépasse significativement celle des autres étudiants; les autres groupes ne se distinguent pas significativement les uns des autres.

Sur la base de ces données, il est tout de même 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 ont probablement des conceptions alternatives au même titre que les étudiants de niveau collégial.

## Justifications au deuxième palier

J'ai procédé à l'analyse des justifications données par les étudiants au deuxième palier, 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. Il est impossible de présenter ici tous les résultats, puisque j'ai obtenu près de 3000 justifications. Voici toutefois quelques résultats sélectionnés pour illustrer le processus suivi durant cette phase.

## 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,  $\text{H}_2\text{O}$ , 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, j'ai décelé chez certains étudiants la présence de conceptions alternatives en lien avec la géométrie moléculaire. Le tableau 8 présente des exemples de justifications d'étudiants (identifiés par leur numéro de sujet) pour ces questions et des conceptions alternatives associées.

**TABLEAU 8 : CONCEPTIONS ALTERNATIVES RÉPERTORIÉES AU SUJET DE LA FORME DES MOLÉCULES À PARTIR DES JUSTIFICATIONS D'ÉTUDIANTS**

Réponse 1 <sup>er</sup> palier	Exemple de justifications d'étudiants	Conception alternative	Erreur de raisonnement
1. c. SCl <sub>2</sub>	« 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.	Simplification excessive
1. c. SCl <sub>2</sub>	« 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.	Causalité inverse
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.	Connexion
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.	Causalité inverse
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.	Demi-raisonnement
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.	Demi-raisonnement

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 Lewis<sup>8</sup> 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 analysant les justifications fournies par les étudiants, il est apparu que les combinaisons réponse-justification se plaçaient dans l'une des trois catégories suivantes : certains étudiants donnaient la bonne réponse et la justifiaient correctement; certains donnaient la mauvaise réponse et rédigeaient une justification erronée au regard de la théorie scientifique; enfin, d'autres donnaient la bonne réponse avec toutefois une justification qui témoignait de la présence de conceptions alternatives. Les justifications ont donc permis de diagnostiquer des conceptions alternatives même chez les « bons » étudiants.

Ces exemples montrent des similitudes avec des conceptions répertoriées dans d'autres recherches, mais j'ai aussi remarqué certaines conceptions jusqu'à présent inédites dans les écrits scientifiques, par exemple la conception selon laquelle les liaisons hydrogène donneraient sa forme à la molécule. Le modèle scientifique considère plutôt qu'à cause de la forme que prend une molécule, elle peut ou non former des liaisons hydrogène efficacement avec ses voisines. Cette conception alternative proviendrait donc d'une confusion entre la cause et la conséquence. Dans la dernière colonne du tableau, le type d'erreur de raisonnement expliquant cette conception est nommé « causalité inverse ». J'aborderai en détail les types d'erreur de raisonnement dans une section subséquente (voir le tableau 10 à la page 84 pour la typologie de ces erreurs).

#### Quelques justifications d'étudiants : les liaisons intermoléculaires

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

---

<sup>8</sup> Ce sont en réalité des structures intermédiaires entre les représentations de Lewis et celles de Crum Brown (qui montrent les liaisons par des traits).

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 INTERMOLECULAIRES 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 9 présente les conceptions alternatives et erreurs de raisonnement pour ces deux items.

TABLEAU 9 : CONCEPTIONS ALTERNATIVES RÉPERTORIÉES AU SUJET DES LIAISONS INTERMOLÉCULAIRES À PARTIR DES JUSTIFICATIONS D'ÉTUDIANTS

Réponse 1 <sup>er</sup> palier (mot-clé)	Exemples de justifications d'étudiants	Conception alternative	Erreur de raisonnement
10 a) (covalente)	« La liaison est polaire (différence d'électronégativité de 1,4) et covalente ( $\neq$ métaux). » (sujet 66)	Toute liaison entre deux atomes non métalliques est covalente.	Simplification excessive
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.	Simplification excessive
10 c) (ionique)	« Je crois que c'est ionique, car c'est encore une fois à cause des charges $\delta+$ et $\delta-$ 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.	Simplification excessive
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.	Simplification excessive
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.	Physique vu comme chimique

Ces deux items sont une bonne illustration de la catégorie d'erreur de raisonnement nommée « simplification excessive ». On remarque que la simplification excessive 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 la conception alternative.

Cette portion 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 conceptions alternatives de ces derniers. Certaines réponses manifestent l'utilisation d'heuristiques qui sont, comme je l'ai expliqué dans la partie 4, « Cadre conceptuel », des contraintes cognitives basées sur un savoir intuitif ainsi que sur des procédures de raisonnement par raccourci, qui permettent donc de juger et de générer des réponses acceptables sans prendre

le temps et l'énergie de faire un raisonnement complet. Toutefois, les réponses ne permettent pas toutes de découvrir des heuristiques, parce que les explications d'étudiants ne sont pas toutes aussi développées, certains se contentant de quelques mots, et qu'elles sont parfois plutôt sibyllines. Toutefois, j'ai pu dégager le type de raisonnement sous-jacent à plusieurs des justifications analysées. La section suivante présente en détail ces types de raisonnement.

### Typologie des erreurs de raisonnement

Parmi les différentes conceptions alternatives dégagées des justifications, certaines relevaient d'une erreur factuelle, d'autres, d'un raisonnement fallacieux, d'autres encore, d'idées naïves. Si les conceptions ont différentes causes cognitives, il semble avantageux de les classer selon ces causes probables pour éventuellement les traiter par des dispositifs différenciés. Comme je l'ai 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). La typologie la plus fructueuse pour les erreurs de raisonnement est le modèle du *Commonsense Reasoning* de Talanquer (2006, 2009), sur lequel est basée la typologie présentée ici. Pour caractériser plus précisément les modes de raisonnement, j'ai raffiné le modèle de Talanquer, qui est censé englober tous les concepts de chimie, en m'attardant uniquement aux concepts de molécules, de polarité, de liaisons intermoléculaires et de phénomènes macroscopiques comme le changement de phase et la solubilité.

La typologie présentée dans le tableau 10 pourrait permettre d'envisager un traitement pédagogique différencié qui prendrait en considération les différences manifestes entre des conceptions variées (Cormier, 2012, 2013). Chaque type d'erreur de raisonnement est ensuite illustré dans les sous-sections qui suivent.

**TABLEAU 10 : TYPOLOGIE DES ERREURS DE RAISONNEMENT EXPLIQUANT LES CONCEPTIONS ALTERNATIVES OBSERVÉES**

<b>Erreur de raisonnement</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
Demi-raisonnement	D-R	Utilisation d'une partie seulement des critères essentiels à une prédiction correcte.
Simplification excessive	SE	Omission de considérer des facteurs importants.
Importance des facteurs	ImpFac	Attribution d'une importance relative incorrecte aux facteurs permettant la prédiction de phénomène.
Argument opposé	ArgOpp	Raisonnement qui pointe vers l'exact opposé de la réponse donnée.
Explication corpusculaire tautologique	ECT	Transposition des propriétés macroscopiques aux particules sous-microscopiques.
Physique vu comme chimique	PcomC	Description d'un changement physique comme s'il s'agissait d'une réaction chimique.
Causalité inverse	Caus	Invocation de la conséquence pour expliquer la cause.
Connexion	Conn	Utilisation d'une notion non reliée à un concept pour expliquer celui-ci.

### 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, CO<sub>2</sub>. Onze étudiants sur 81 (14 %) ont choisi cette option, qui est incorrecte, car la molécule de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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.

J'ai également observé le demi-raisonnement inverse, 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 une conception alternative, mais simplement un raccourci dans la façon de rédiger la justification.

Au fil des questions, j'ai relevé d'autres demi-raisonnements. 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 je l'ai 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. J'ai observé ces deux demi-raisonnements dans la phase pilote aussi. Voici des exemples de justifications n'invokant que les doublets libres...

Parce que le S a deux doublets d'électrons libres [dans le  $\text{SCl}_2$ ]. (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)

J'ai observé l'autre demi-raisonnement, celui voulant que seuls les atomes périphériques influencent la structure, dans l'item qui demandait aux étudiants la raison expliquant la forme de la molécule d'eau. En plus des extraits déjà présentés dans le tableau 8, en voici un autre :

Car les charges contraires se repoussent, soit la charge entre les 2  $\text{H}^+$ . (sujet 131)

Cette erreur de 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 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.

### Simplification excessive

La simplification excessive 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 excessive est exacte.

Un exemple frappant de simplification excessive 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 excessive, 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, entre ceux-ci, 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 *overgeneralization*, 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 excessive, 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,  $\text{SOCl}_2$ , puis en construire un modèle moléculaire en pâte à modeler. S'ils n'y parvenaient pas, je leur demandais plutôt de dessiner celle de l'ion ammonium,  $\text{NH}_4^+$ , et d'en faire un modèle en pâte à modeler. La molécule de  $\text{SOCl}_2$  est pyramidale à base triangulaire et l'ion ammonium est tétraédrique, comme représenté à la figure 15.

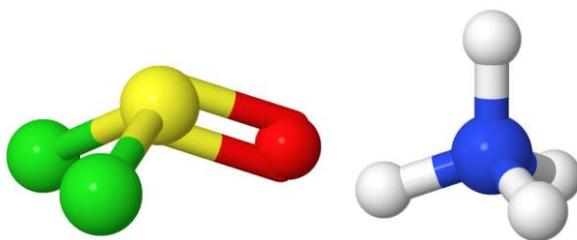


FIGURE 15 : MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DE LA MOLÉCULE DE CHLORURE DE THIONYLE (À GAUCHE) ET DE L'ION AMMONIUM (À DROITE)

Cinq étudiants sur les onze qui ont participé aux entrevues ont construit un modèle planaire du  $\text{SOCl}_2$  ou de l'ion ammonium. Les photographies de leur modèle sont présentées à la figure suivante.

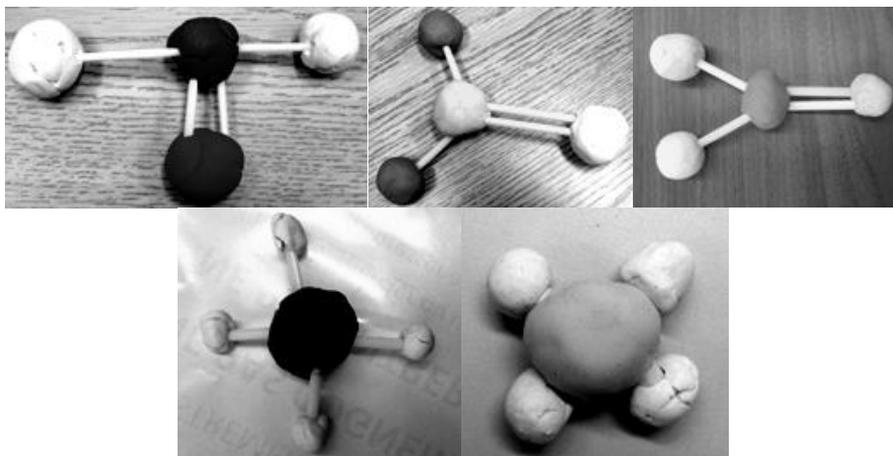


FIGURE 16 : PHOTOGRAPHIES DES MODÈLES PLANAIRES CONSTRUITS PAR LES ÉTUDIANTS

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 conceptions alternatives de la catégorie « Simplification excessive » déjà présentées au tableau 9, 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 raisonnement « simplification excessive », on trouve la conception alternative 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.

Cette erreur de raisonnement et les conceptions alternatives qui en découlent semblaient fertiles, aussi je les ai étudiées plus avant dans la phase principale de cette recherche, et j'y reviendrai plus loin.

### 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 d'erreur de raisonnement, qui mène la plupart du temps à une mauvaise prédiction. Pour les participants à la présente recherche, il était possible de commettre une telle erreur de raisonnement 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. Selon le modèle de Taber (2001b), présenté brièvement dans la partie 1, « Problématique », on pourrait classer cette erreur de raisonnement comme un obstacle de fragmentation, parce que les étudiants connaissent les concepts, mais les mettent mal ou peu en relation les uns avec les autres.

J'ai aussi observé cette erreur de raisonnement liée à l'importance relative des facteurs 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  $\delta^+$  et  $\delta^-$  qui alignent les molécules d'une certaine façon. (sujet 81)

Pour certains étudiants, l'attribution d'une importance relative incorrecte aux facteurs peut se confondre avec une simplification excessive, où le bon facteur n'est en réalité pas pris en compte du tout. Comme pour la simplification excessive, l'attribution de l'importance des facteurs peut aussi résulter d'un

manque de connaissances et relever de l'obstacle de carence et non pas de l'obstacle de fragmentation.

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.

### Argument opposé

L'erreur de raisonnement nommée « argument opposé » est certainement la plus troublante. Lorsqu'ils commettent cette erreur de raisonnement, les étudiants construisent un argumentaire qui pointe exactement à l'opposé de la réponse qu'ils donnent.

Lorsqu'on leur demandait de choisir la représentation montrant une molécule polaire, les étudiants qui commettaient cette erreur de raisonnement choisissaient plutôt une molécule non polaire, soit la structure triangulaire plane a) ou la structure tétraédrique d) présentées ci-dessous.

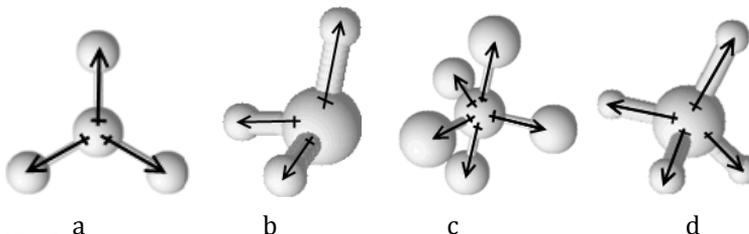


FIGURE 17 : CHOIX DE RÉPONSE À LA QUESTION « LAQUELLE EST POLAIRE, BOULES ET BÂTONNETS », DANS LA VERSION DU QUESTIONNAIRE À JUSTIFICATION OUVERTE. LA BONNE RÉPONSE EST B)

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 polaire. (sujet 180)

J'ai aussi observé d'autres arguments opposés. 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)

### 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 niveaux. Une des conceptions alternatives fréquentes à propos de la transition du sous-microscopique au macroscopique est la transposition de propriétés propres à un niveau aux objets de l'autre. J'ai observé dans la présente étude une telle erreur de raisonnement, 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). 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 au niveau macroscopique.

Bien que cette conception alternative soit assez marginale, je l'ai également 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 au niveau 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.

### Physique vu comme chimique

Cette erreur de raisonnement, probablement la plus nuisible à l'apprentissage de la chimie, mérite qu'on s'y attarde. Les étudiants qui faisaient cette erreur manifestaient la conception alternative selon laquelle les molécules se brisent lors de changements physiques comme les changements de phase.

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

Dans la molécule de méthanol, il existe beaucoup moins de liaisons que dans la molécule d'éthanol (voir dessins). [schémas : structures développées] (sujet 88)

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)

Je rapporte ici ces réponses 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, j'ai aussi posé cette question lors de la phase principale de cette étude; je présenterai plus loin ces résultats.

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 erreur de raisonnement sur l'apprentissage de la

réactivité chimique. Il est aussi assez surprenant de voir jusqu'à quel point cette erreur est répandue, même si on enseigne le changement de phase aux étudiants depuis le secondaire.

Dans la même catégorie d'erreur de raisonnement selon laquelle 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 du rapport concernant la phase principale de l'étude 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.

### Causalité inverse

Lors de l'analyse des résultats de la présente recherche, j'ai déterminé qu'un étudiant commettait une erreur de raisonnement de « causalité inverse » s'il invoquait la conséquence pour expliquer la cause d'un phénomène. Cette erreur est une contradiction à la logique même, puisqu'il est entendu que la cause précède l'effet.

Les réponses des étudiants fournissaient deux exemples de causalité inverse. Le premier concernait 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 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 raisonnement pourrait s'articuler comme ceci : la molécule est polaire parce qu'elle peut faire des ponts H. C'est une causalité inverse, le raisonnement correct étant plutôt qu'elle peut faire des ponts H parce qu'elle est polaire (entre autres conditions).

L'autre exemple de causalité inverse a été présenté au tableau 8 : un étudiant expliquait qu'une molécule est linéaire parce qu'elle est non polaire, la polarité étant en fait une conséquence et non une cause de la forme d'une molécule.

### Connexion

L'erreur de type « Connexion » est une erreur de raisonnement du même ordre que la causalité inverse, c'est-à-dire une faute de raisonnement formel dans laquelle 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 erreur de connexion :

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 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.

Selon le modèle de Talanquer (2006, 2009), les erreurs que j'ai 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 erreurs 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 diagnostic de conception alternative.

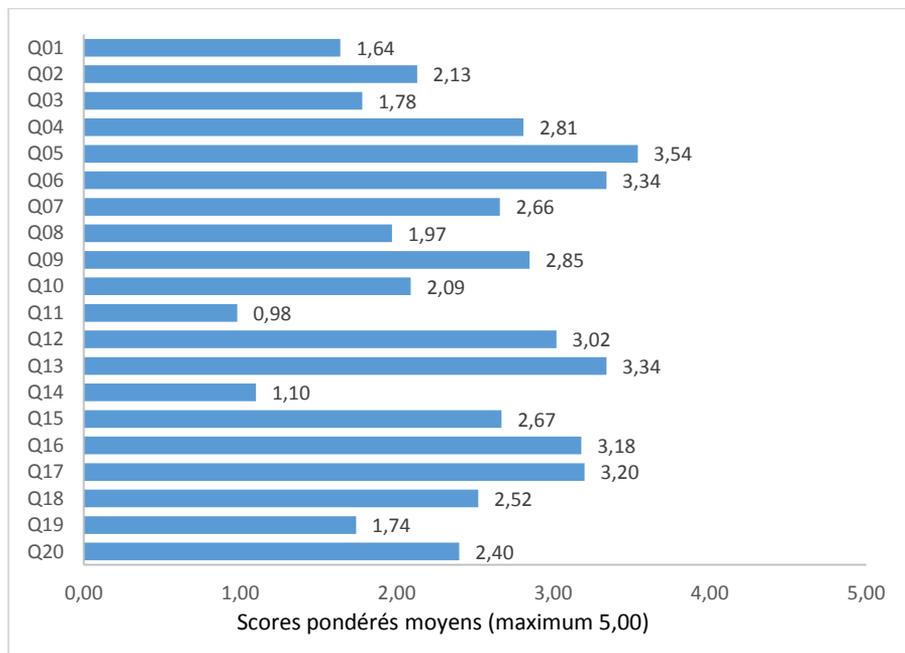
### Phase principale

En ce qui a trait aux résultats de la phase principale de la recherche, je présenterai le score pondéré pour chaque item avant d'aborder l'essentiel de ce que je visais à cerner, c'est-à-dire les conceptions alternatives relevées dans les réponses des étudiants.

### 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 2. Le score pondéré 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. Je m'attendais toutefois à de tels scores, 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 diagnostiquer les conceptions alternatives dont je soupçonnais la présence.

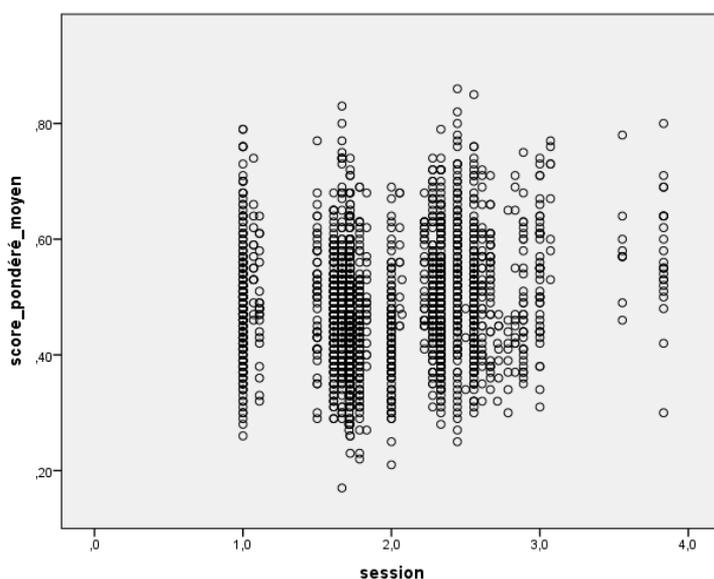
Les scores sont assez variables d'un item à l'autre, montrant que certains (Q05, Q13) étaient plus faciles que d'autres (Q11, Q14). Malgré cela, j'ai relevé des conceptions chez les étudiants dans chaque item, pour certains dans une plus grande proportion que pour d'autres. Avant de présenter ces conceptions, voici une analyse des scores pondérés en fonction des variables indépendantes de l'étude.

#### 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 point « 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 test<sup>9</sup>. 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.

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).

<sup>9</sup> 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. J'ai apporté une correction au calcul de la variable « session » pour les étudiants de ces cégeps.

Ce n'est qu'à  $R = 0,30$  que la corrélation est moyenne, et à  $R = 0,50$  qu'elle est forte.

J'ai procédé à la même analyse 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 (BI), 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 du BI constituent deux populations différentes. Toutefois, trop peu de données sur les étudiants du BI 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 du BI 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 du BI 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'éta-carré ( $\eta^2$ ) de 0,015. L'effet est de petite taille si  $\eta^2$  est autour de 0,01, de taille moyenne autour de 0,06 et de grande taille autour de 0,14 (Cohen, 1988). L'éta-carré est calculé de la façon suivante :

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

Lorsque je retire des résultats les étudiants du BI, la corrélation entre la session et le score pondéré total devient non significative pour l'un des établissements qui ont fait participer des étudiants du BI, 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, j'ai aussi calculé le score pondéré pour chaque item de même qu'un coefficient de corrélation linéaire entre le score pondéré et la session, pour chacune des questions. Le tableau 11 ci-dessous présente les résultats.

**TABEAU 11 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE PEARSON ( $R$ ) ENTRE LE SCORE PONDÉRÉ À CHAQUE ITEM ET LA SESSION**

Item	R	$p$ (bilatérale)	Item	R	$p$ (bilatérale)
Q01	0,024	0,283	Q11	0,063	0,005
Q02	0,125	0,000	Q12	0,069	0,002
Q03	0,038	0,089	Q13	0,004	0,855
Q04	0,110	0,000	Q14	0,044	0,048
Q05	0,017	0,442	Q15	0,051	0,022
Q06	0,063	0,005	Q16	0,097	0,000
Q07	0,058	0,009	Q17	0,062	0,006
Q08	0,052	0,020	Q18	-0,015	0,493
Q09	0,007	0,770	Q19	0,098	0,000
Q10	0,009	0,676	Q20	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 ( $R \leq 0,125$ ).

### Effet de genre et de région

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 ( $\eta^2$  entre 0,00 et 0,02), sauf pour la question Q15, où la taille d'effet est moyenne (Cohen, 1988). Le tableau 12 présente le score des garçons et des filles pour ces dix items. Le texte des items est présenté à l'annexe 2.

TABLEAU 12 : ITEMS POUR LESQUELS LE SCORE PONDÉRÉ EST DIFFÉRENT SELON LE GENRE

Numéro et titre de l'item	Score pondéré moyen			<i>t</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
	Garçons	Filles				
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 <sub>éb</sub> , 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 diagnostiquer des conceptions alternatives. À la lumière de ces résultats, il semble que les garçons ont moins de conceptions alternatives 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).

Quant au score pondéré total au test selon la région du Québec où se trouvait le cégep, j'ai comparé seulement les résultats des six régions dans lesquelles plus d'un établissement a participé à la recherche. 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 13 à la suite présente les sous-ensembles homogènes tels qu'établis par un test de Waller-Duncan.

TABLEAU 13 : SOUS-ENSEMBLES HOMOGENES DE RÉGIONS DU QUÉBEC QUANT AU SCORE PONDÉRÉ MOYEN AU TEST « MOLÉCULES, POLARITÉ ET PHÉNOMÈNES »

Région	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
Bas-Saint-Laurent	64	0,4463		
Chaudière-Appalaches	44	0,4575	0,4575	
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.

#### Effet cégep public/collège privé

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,  $t = 0,641$  ( $ddl = 1981$ ),  $p = 0,522$ .

### Conceptions alternatives relevées

Au-delà des scores, le test « Molécules, polarité et phénomènes » visait surtout le diagnostic de conceptions alternatives. Dans cette section je présenterai ces conceptions alternatives, dont le tableau 14 dresse un aperçu. L'annexe 3 fournit un tableau complet où les conceptions sont classées selon les items qui ont permis de les diagnostiquer.

**TABLEAU 14 : APERÇU DES CONCEPTIONS ALTERNATIVES DIAGNOSTIQUÉES PAR LE TEST « MOLÉCULES, POLARITÉ ET PHÉNOMÈNES »**

Erreur de raisonnement	Abréviation	Nombre de conceptions alternatives	Sur les sujets
Demi-raisonnement	D-R	13	Forme des molécules, liaisons intermoléculaires, mise en solution, notion de molécule, polarité des liaisons, polarité des molécules.
Simplification excessive	SE	15	Forme des molécules, liaisons intermoléculaires, mise en solution, nature corpusculaire de la matière, notion de molécule, polarité des molécules, solubilité, structure sous-microscopique des solides.
Importance des facteurs	ImpFac	4	Mise en solution, solubilité, structure sous-microscopique des solides.
Argument opposé	ArgOpp	2	Notion de molécule, polarité des molécules.
Explication corpusculaire tautologique	ECT	5	Différence élément/composé, changement de phase, nature corpusculaire de la matière.
Physique vu comme chimique	PcomC	4	Liaisons covalentes, mise en solution.
Causalité inverse	Caus	3	Forme des molécules, polarité des molécules.
Connexion	Conn	3	État de la matière, forme des molécules.

Les conceptions qui sont rapportées dans le tableau 14 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 al., 2008; Peterson et al., 1989). Dans

les sections qui suivent, certaines conceptions dérogent à cette règle habituelle; je les ai retenues lorsqu'elles étaient pertinentes pour tracer le portrait des étudiants de Sciences.

En plus de ces conceptions, j'ai observé dix-sept erreurs. Les erreurs se distinguent des conceptions alternatives en ce qu'elles sont simplement inexactes, mais ne traduisent pas de représentation alternative des modèles scientifiques. Par exemple, une erreur dans l'addition vectorielle n'est pas considérée comme une conception alternative, car aucune notion conceptuelle ne doit être invoquée pour réaliser cette tâche; une telle erreur résultera plutôt d'un problème de visualisation spatiale ou simplement d'un manque de connaissance sur les vecteurs. Je traiterai de quelques erreurs pertinentes au fil des sections suivantes.

Certaines conceptions alternatives touchent un grand pourcentage des étudiants, une situation qui devrait préoccuper les enseignants de chimie. Plusieurs de ces conceptions 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 conceptions relevées pendant cette recherche.

### Conceptions alternatives 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 conceptions alternatives diagnostiquées à propos de la notion de molécule.

TABLEAU 15 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LA NOTION DE MOLÉCULE

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

Comme je l'avais observé dans la partie préliminaire de l'étude, la conception alternative 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 conceptions alternatives diagnostiquées dans le cadre de cette étude. Deux items étaient destinés à sonder cette conception : 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 conception alternative. La différence entre ces deux pourcentages peut s'expliquer par la difficulté de la question. L'item 2 demandait lequel d'un sel ( $\text{NH}_4\text{Br}$ ) ou d'un composé moléculaire ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 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  $\text{NH}_4\text{Br}$  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 la même erreur de raisonnement. La conception alternative associée à cette question est classifiée comme une simplification excessive, 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 de diagnostiquer d'autres conceptions alternatives, bien entendu avec des pourcentages plus modestes. Une seule autre conception 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 la conception alternative « 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, j'ai observé un argument opposé, « 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.

### Conceptions alternatives sur la forme des molécules

Il a déjà été question de la plupart des conceptions alternatives sur la forme des molécules dans la section sur la phase pilote de la recherche. Le tableau 16 présente les principales conceptions alternatives sur ce sujet que j'ai diagnostiquées lors de la phase principale.

TABLEAU 16 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LA FORME DES MOLÉCULES

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide.	Conn	Q04	a2	549 (27,7 %)
La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les doublets libres.	D-R	Q03	a1, b1	508 (25,6 %)
La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les atomes périphériques.	D-R	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.	D-R	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.	D-R et plus	Q03	a3	327 (16,5 %)
Une molécule a la forme de sa structure de Lewis.	SE	Q04	b2, c2	466 (23,5 %)
Une molécule symétrique est linéaire.	SE	Q04	b3, c3	235 (11,9 %)
La forme d'une molécule est causée par les liaisons hydrogène qu'elle peut faire.	Caus	Q03	c1, c2, c3	544 (27,4 %)
La forme d'une molécule est causée par sa polarité.	Caus	Q16	b2, c2	276 (13,9 %)
		Q04	c1	151 (7,6 %)

La conception alternative la plus fréquente sur ce sujet est la première, soit l'erreur de raisonnement 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 de raisonnement. 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, j'ai 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 conception alternative. La conception alternative 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 conceptions alternatives 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.

J'ai également observé deux simplifications excessives : « une molécule a la forme de sa structure de Lewis » (23,5 %) et « une molécule symétrique est linéaire » (11,9 %). Enfin, j'ai relevé deux erreurs de causalité, 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 ». 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.

### Conceptions alternatives 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 conceptions alternatives principales concernaient la polarité des molécules. 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 cette conception variait d'une question à l'autre, entre 5,6 % pour la Q05 et 24,1 % pour la Q07. Le tableau 17 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 17 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LA POLARITÉ

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	D-R	Q07	a1, b1, c1	477 (24,1 %)
	D-R	Q09	b3	301 (15,2 %)
	D-R	Q05	a3, b3	112 (5,6 %)
Une liaison double est plus polaire qu'une liaison simple.	D-R	Q09	b1	378 (19,1 %)
Argument non polaire pour polaire.	ArgOpp	Q05	a1, c3	246 (12,4 %)
	ArgOpp	Q07	a3, b3, c3	189 (9,5 %)
	ArgOpp	Q09	c3	97 (4,9 %)
Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	SE	Q09	a1	216 (10,9 %)
	SE	Q19	b3	142 (7,2 %)
Une molécule est polaire parce qu'elle fait des liaisons hydrogène.	Caus	Q09	a2	142 (7,2 %)

J'ai toutefois observé chez 19,1 % des répondants un autre demi-raisonnement, 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 ».

De même, la conception alternative « 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, j'ai relevé certaines erreurs dans les réponses des étudiants, sans toutefois diagnostiquer de conceptions alternatives. Le tableau 18 regroupe ces erreurs.

TABLEAU 18 : ERREURS OBSERVÉES DANS LA PRÉDICTION DE LA POLARITÉ

Erreur	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Erreur dans la prédiction de la forme d'une molécule OU	Q07	a2, b2	1169 (59,0 %)
Erreur dans l'addition vectorielle.	Q05	a2, c1	328 (16,5 %)
Erreur dans l'addition vectorielle.	Q09	a3	58 (2,9 %)
Erreur dans la prédiction de la polarité d'une substance (sans pouvoir en déterminer la raison).	Q19	a1	517 (26,1 %)
	Q11	a2, c2	433 (21,8 %)
	Q06	b3, c3	127 (6,4 %)

À la question Q07, 1111 étudiants ont choisi la molécule a) ( $\text{XeF}_4$ ) 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  $\text{XeF}_4$  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  $\text{XeF}_4$  ne s'annulaient pas entre eux n'avaient peut-être pas de conception alternative à ce sujet, c'est pourquoi j'ai plutôt considéré ces 59,0 % des répondants 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).

J'ai observé d'autres erreurs 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. J'ai observé des erreurs 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  $\text{H}_2\text{Se}$  et du  $\text{SiF}_4$ , et Q19, à propos du  $\text{CO}_2$ ) 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.

### Conceptions alternatives sur les liaisons chimiques

Comme je l'annonçais 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 conceptions alternatives 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 conceptions alternatives les plus fréquentes diagnostiquées 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 19 présente les pourcentages d'étudiants montrant ces conceptions alternatives. Les conceptions se rapportant au cadre alternatif des liaisons chimiques sont dans les cellules grisées de ce tableau.

TABLEAU 19 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LES LIAISONS CHIMIQUES

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
<i>Liaisons intermoléculaires</i>				
Les liaisons intermoléculaires sont les liaisons à l'intérieur des molécules.	SE	Q11	b1, c3	979 (49,4 %)
Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	SE	Q17	b1, b2, b3, c1, c2, c3	778 (39,2 %)
	SE	Q13	a1, a2	450 (22,7 %)
Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	D-R	Q17	a1	325 (16,4 %)
	D-R	Q11	a3	137 (6,9 %)
L'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement causée par la taille des molécules.	D-R	Q11	b2, c1	207 (10,4 %)
Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	SE	Q18	a3, b2	221 (11,1 %)
	SE	Q13	b2, c3	193 (9,7 %)
	SE	Q17	a3	188 (9,5 %)
<i>Liaisons covalentes</i>				
L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	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.	PcomC	Q19	b1	212 (10,7 %)

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 conception alternative sur la nature des liaisons intermoléculaires. D'autres études ont aussi rapporté cette confusion (Othman et al., 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 conceptions alternatives 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.

J'ai observé deux autres demi-raisonnements, 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.

### Conceptions alternatives sur l'état de la matière

J'ai seulement observé deux conceptions alternatives autour de l'état de la matière, car moins d'items se prêtaient au diagnostic sur ce sujet. Le tableau 20 présente ces résultats.

**TABLEAU 20 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR L'ÉTAT DE LA MATIÈRE**

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	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.	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 niveau 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 niveaux de représentation 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 me semble intéressant de souligner une autre erreur de raisonnement, de type « Connexion », qui ressemble à certaines idées naïves. Grâce à la question Q12, j'ai 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, au final, 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.

### Conceptions alternatives 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 21 présente les conceptions sur ces sujets.

**TABEAU 21 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LA SOLUBILITÉ ET LA MISE EN SOLUTION**

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	PcomC	Q10	a3, c1	383 (19,3 %)
		Q19	c1	63 (3,2 %)
La mise en solution de composés moléculaires résulte en la réorganisation du solvant et du soluté en de nouveaux composés.	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.	D-R	Q10	a1	287 (14,5 %)
Aucune liaison intermoléculaire n'est formée ni brisée lors de la mise en solution.	SE	Q10	b3	472 (23,8 %)
La mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant.	CcomP	Q19	a3	221 (11,1 %)
Il n'y a pas de liaisons intermoléculaires entre les molécules dans une solution.	CcomP	Q10	b1, b2	244 (12,3 %)
La formation de ponts H avec l'eau assure qu'un composé y est très soluble.	ImpFac	Q19	b2, c2	541 (27,3 %)
La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à l'ionisation.	ImpFac	Q06	a1, b1, c1	1050 (53,0 %)
La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à la polarité.	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 que je nommais le « grand sac » des définitions des liaisons chimiques (voir la section « Conceptions alternatives sur les liaisons chimiques » à la page 111). 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. J'ai observé ces deux conceptions alternatives particulièrement 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 conceptions suivantes du tableau 21, selon lesquelles 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 une simplification excessive 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. J'ai observé ces conceptions chez 14,5 % et 23,8 % des étudiants. Parce qu'elle pousse à l'extrême ce même raisonnement, j'ai classé la conception alternative suivante du tableau 21, soit « la mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant » (11,1 % des répondants), 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 conceptions alternatives sur la solubilité sont des erreurs de raisonnement du type « Importance des facteurs ». C'est-à-dire que les choix de réponses qui mènent à leur diagnostic 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.

### Conceptions alternatives sur la nature corpusculaire de la matière

J'ai également diagnostiqué quelques conceptions alternatives à propos de la nature corpusculaire de la matière, la plupart faisant partie de la catégorie « Explication corpusculaire tautologique ». Le tableau 22 présente ces conceptions.

TABLEAU 22 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LA NATURE CORPUSCULAIRE DE LA MATIÈRE

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Les atomes ont des propriétés macroscopiques pareilles à celles de l'élément qu'ils constituent.	ECT	Q01	a1, a2, a3, c1, c2, c3	1308 (66,0 %)
Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	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.	ECT	Q08	a2, a3, c2	1011 (51,0 %)
Les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la substance qu'ils constituent.	SE	Q01	b2	256 (12,9 %)
L'évaporation entraîne une disparition de la matière.	Erreur	Q15	a3, c2	413 (20,8 %)

J'ai démontré dans la section sur l'état de la matière 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 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 heuristique menant à une mauvaise réponse.

La simplification excessive « 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 et le niveau des atomes, c'est bien les propriétés de combinaison chimique. À la question Q01, 12,9 % des étudiants ont sélectionné la réponse correspondant à cette conception.

Enfin, j'ai également placé une erreur à propos de la conservation de la matière dans le tableau 22. 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.

### Conceptions alternatives sur la structure sous-microscopique des solides

La présente recherche a permis de détecter seulement deux conceptions alternatives 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 23.

**TABEAU 23 : PRINCIPALES CONCEPTIONS ALTERNATIVES SUR LA STRUCTURE SOUS-MICROSCOPIQUE DES SOLIDES**

Conception alternative	Catégorie	Item	Choix de réponse	Nombre de répondants (%)
Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	SE	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.	ImpFac	Q16	b1, c1	556 (28,0 %)

D'abord, j'ai relevé une simplification excessive concernant la structure de l'eau solide. 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 excessive, 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 conception alternative très dramatique, puisqu'elle n'aurait probablement pas beaucoup d'impact sur les apprentissages subséquents en chimie; on peut aussi s'imaginer qu'elle correspond probablement à un obstacle de carence se réglant 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 deuxième conception alternative sur l'eau solide, une erreur de raisonnement 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. J'ai 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.

### Corrélations entre les conceptions

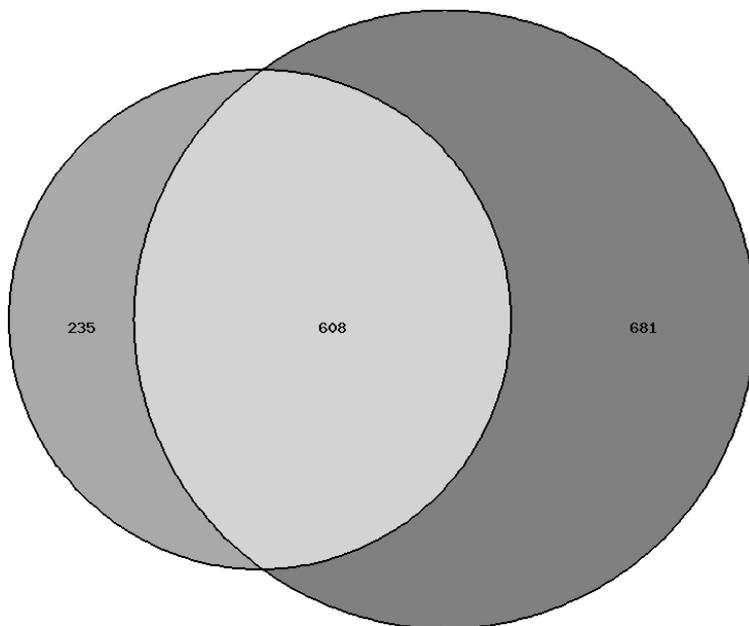
Comme les items du test « Molécules, polarité et phénomènes » dont je viens de présenter les résultats concernent des sujets qui sont sinon directement liés entre eux, du moins connexes, il était intéressant d'établir des corrélations entre les scores pondérés (le score de chaque question) et le score pondéré total (le score au test complet). Le tableau suivant présente ces corrélations.

TABLEAU 24 : 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 faibles, 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 en lien avec l'étendue du test, qui couvre de nombreux sujets de chimie et vise à diagnostiquer plusieurs conceptions alternatives. En ce sens, le test permet de recueillir des informations précieuses sur les conceptions des étudiants québécois, mais les résultats ne semblent pas pouvoir être interprétés pour établir des profils de répondants.

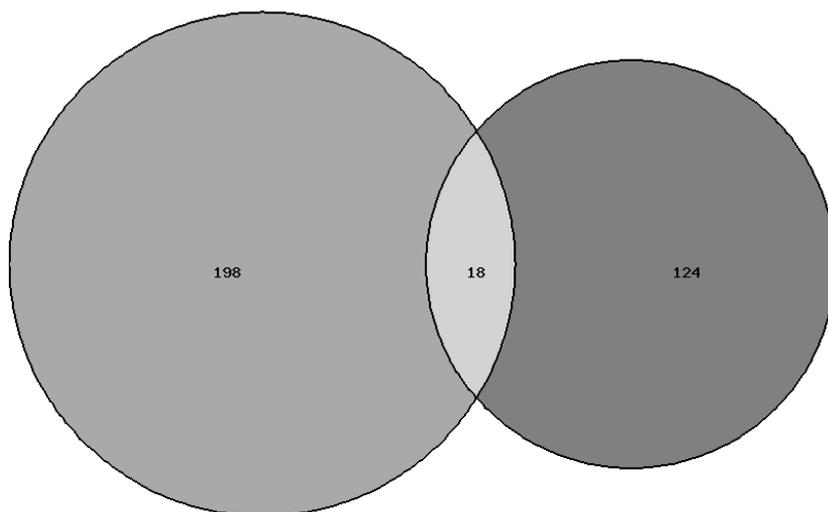
On peut observer une corrélation entre certaines questions qui vérifient une même conception alternative. Par exemple, les items Q12 et Q18 vérifiaient tous les deux la conception alternative « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides ». La figure 18 présente tous les répondants qui ont démontré cette conception alternative 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 CONCEPTION ALTERNATIVE « 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 conception alternative « les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides » à la fois dans l'item Q12 et dans l'item Q18. D'autres conceptions alternatives se manifestent de façon moins cohérente d'une question à l'autre. La figure 19

illustrant la corrélation entre une conception diagnostiquée par les items Q09 et Q19 présente un de ces cas.



**FIGURE 19 : DIAGRAMME DE VENN POUR LA CONCEPTION ALTERNATIVE « 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 conception alternative « une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire ». Pour exprimer l'intersection entre les questions qui diagnostiquent la même conception alternative, j'ai calculé la proportion d'intersection. Ce paramètre prend une valeur entre 0 (aucune intersection) et 1 (les deux ensembles sont complètement superposés) et il se calcule de la façon suivante :

$$\text{Proportion d'intersection} = \frac{\text{Nombre de répondants dans l'intersection}}{\text{Moyenne des répondants dans chaque ensemble}}$$

Le tableau 25 qui suit présente la proportion d'intersection pour les conceptions alternatives les plus fréquemment observées qui pouvaient être détectées par plus d'une question et dont il a été question précédemment.

**TABLEAU 25 : PROPORTION D'INTERSECTION POUR LES CONCEPTIONS ALTERNATIVES DIAGNOSTIQUÉES DANS PLUS D'UN ITEM**

<b>Conception alternative (catégorie)</b>	<b>Dans les items</b>	<b>%</b>	<b>Prop. d'intersect.</b>
Tout regroupement d'atomes est une molécule (SE).	Q02 ∩ Q20	78,9 et 50,5	0,640
Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides (SE).	Q12 ∩ Q18	42,5 et 65,0	0,570
L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules (PcomC).	Q14 ∩ Q15	61,6 et 42,8	0,532
Argument non polaire pour polaire (ArgOpp).	Q05 ∩ Q07	12,4 et 9,5	0,446
Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes (SE).	Q13 ∩ Q17	22,7 et 39,2	0,305
Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes (ECT).	Q08 ∩ Q14	11,0 et 5,5	0,159
Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires (D-R).	Q07 ∩ Q09	24,1 et 15,2	0,154
Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent (ECT).	Q12 ∩ Q16	11,5 et 11,0	0,143
Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène (D-R).	Q11 ∩ Q17	6,9 et 16,4	0,115
Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire (SE).	Q09 ∩ Q19	10,9 et 7,2	0,100
Une molécule est formée de non-métaux (D-R).	Q02 ∩ Q20	4,0 et 3,5	0,095
L'intensité des liaisons intermoléculaires (et non l'énergie cinétique des molécules) explique l'état de la matière (Conn).	Q12 ∩ Q18	3,5 et 9,0	0,073
La forme d'une molécule est due à sa polarité (Caus).	Q04 ∩ Q16	7,6 et 13,9	0,070
Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau (PcomC).	Q10 ∩ Q19	19,3 et 3,2	0,054

Les conceptions alternatives qui ont la plus forte proportion d'intersection sont celles qu'on peut considérer comme les plus cohérentes dans l'échantillon questionné. Il est intéressant de remarquer que deux d'entre elles, « l'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules » et « les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes » font partie du cadre conceptuel de la liaison chimique, qui semble effectivement être un cadre alternatif cohérent sur lequel les étudiants appuient leur raisonnement, au détriment du modèle scientifique.

## 7. Discussion

J'ai donc observé de nombreuses conceptions alternatives 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 al., 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 représentations, 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 représentations adéquates des modèles 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.

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, je reprendrai ici les conceptions alternatives les plus saillantes que j'ai observées dans ma recherche et je ferai certaines recommandations, tirées notamment de recherches antérieures sur des populations semblables à celles du Québec.

### La définition de la molécule : un problème criant

Je mentionnais 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  $\text{NH}_4\text{Br}$  n'existe pas sous forme de molécules.



Schéma 1

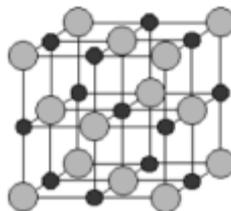


Schéma 2

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 ». On leur a probablement enseignée, mais ils auront construit une définition « simplifiée » du concept dans leurs propres représentations. 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 (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, j'ai proposé, dans la partie « Notion de chimie » de ce rapport, 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 niveaux de représentation (sous-microscopique, macroscopique et symbolique, comme expliqué dans la partie « 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 niveaux de représentation.

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 niveau de représentation à l'autre : ils procèdent seulement au niveau symbolique. Quand la situation est plutôt représentée de façon schématique, les étudiants doivent opérer la transition entre le niveau sous-microscopique et le 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  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NH}_4\text{Br}$  existent sous forme de molécule, le manque de familiarité des étudiants avec les ammoniums (composés ioniques contenant l'ion ammonium,  $\text{NH}_4^+$ ) explique probablement une partie des résultats. Si j'avais plutôt demandé de trancher entre  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et un sel plus familier, comme  $\text{NaCl}$ , la distribution aurait probablement été différente; j'aurais alors pu être certaine que ceux qui choisissent le sel croient que tout assemblage d'atomes constitue une molécule. 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 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). J'ajouterais 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.

### 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 répondu selon le mode de raisonnement de l'explication corpusculaire tautologique (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) adhère 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 raisonnement « 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 au niveau 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). Mon expérience de cette question avec les étudiants m'indique 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).

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 au niveau 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 niveaux de représentation 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,

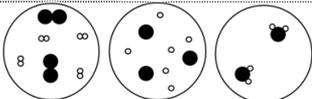
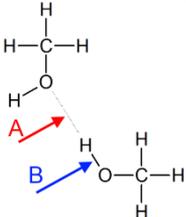
l'hypochlorite de calcium étant une « non-molécule » (c'est un composé ionique), et même aller plus loin en amenant les étudiants à réfléchir sur la distinction entre un composé ionique solide et une solution aqueuse de ce composé. La présente recherche ne s'est pas penchée sur ce dernier sujet, qui toutefois s'avérerait probablement un terrain fertile en conceptions alternatives.

### Trois items caractéristiques pour les étudiants ayant le plus de difficulté

J'ai analysé les résultats aux différentes questions pour trouver des patrons de réponse cohérents. Comme je l'ai mentionné précédemment, j'ai observé peu de cohérence entre les conceptions. 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, j'ai regroupé les étudiants ayant choisi la mauvaise réponse au premier palier. Pour chaque question, j'ai comparé le score pondéré par item de ces étudiants 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 26 présente un résumé.

TABLEAU 26 : RÉSUMÉ DES ITEMS Q05, Q15 ET Q17, LES ITEMS D'ANCRAGE POUR LES ÉTUDIANTS AYANT LE MOINS BIEN PERFORMÉ

Item	Choix de réponse, 1 <sup>er</sup> 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.

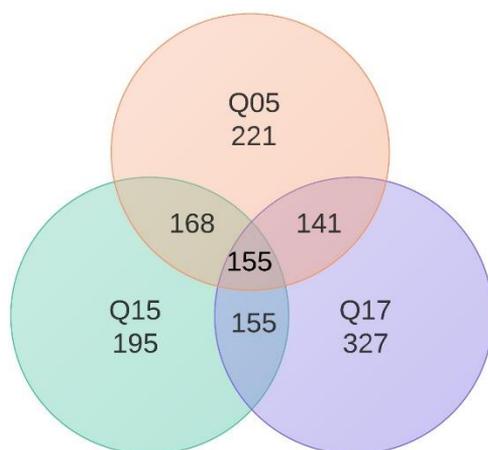


FIGURE 21 : DIAGRAMME DE VENN REPRÉSENTANT LA DISTRIBUTION DES ÉTUDIANTS AYANT INCORRECTEMENT RÉPONDU AUX ITEMS Q05, Q15 ET Q17

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.

### 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 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.

Mes conclusions se rapprochent de celles de Furió et Calatayud (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 j'ai parlé dans la partie « Cadre conceptuel ». Pour éviter que les étudiants aient recours à celle-ci lorsque vient le temps de prédire la polarité des molécules, Furió et Calatayud 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 de prédiction; ils auraient ainsi moins tendance, par la suite, à suivre un raccourci résoudre ce genre de problème.

### Évaporation de l'eau : ne donne pas de l'eau pour plusieurs étudiants

À la question Q15 (« Vue grossière 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. Je m'attendais à cette conception alternative, 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 & Robinson, 2002) : 29 % des étudiants avaient choisi les options où les atomes d'oxygène et d'hydrogène des molécules d'eau formaient 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. Les 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 niveau de représentation (le niveau symbolique), alors que pour répondre à Q14, il fallait de plus invoquer le niveau 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 que j'ai notées dans ma pratique d'enseignement et que reconnaîtront peut-être mes collègues. Dans le cours de deuxième année, Chimie organique, nos 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 confus : 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 niveaux de représentation. 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 niveau de représentation (le niveau 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 que nous demandons 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 °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, j'ai intégré, dans un manuel de Chimie organique pour le niveau collégial (Voisard & Cormier, 2013) des capsules de changement conceptuel nommées « Au-delà des conceptions ». Sur la base des conceptions alternatives que j'ai relevées durant cette recherche, et avec l'apport des écrits scientifiques, je propose dans ces capsules 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.

### Où est la liaison hydrogène? Partout!

La conception alternative diagnostiquée 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 observée à la question Q15, concernant le bris des liaisons covalentes lors de l'évaporation. Un étudiant qui possède ces deux conceptions alternatives 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 que je mentionnais 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, j'ai encore observé la difficulté qu'ont les étudiants d'interpréter les notions au niveau de représentation sous-microscopique. 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 je l'ai observé chez 979 répondants (à la question Q11). Peterson et Treagust (1989) ont également détecté cette conception alternative 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 de 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 de nos 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.

### Habilités 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, j'ai observé 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 au niveau macroscopique.

Effectivement, les notions en lien avec 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 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 cours 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 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 tenteraient 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 je l'ai 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 diagnostiquaient pas 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.

### Limites de la recherche

Un avantage de cette recherche est d'avoir questionné un grand nombre d'étudiants, durant la phase principale. Pour atteindre ce grand nombre de

participants, j'ai utilisé un questionnaire à deux paliers à choix multiples pour le diagnostic 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, alors que lorsqu'on fournit les choix de réponse aux répondants, ceux-ci doivent choisir celui qui correspond le plus à ce qu'ils pensent réellement. La façon dont j'ai construit l'outil ainsi que la plateforme Web sur laquelle la passation a eu lieu ont toutefois contrebalancé cette faiblesse. D'abord, j'ai conçu les choix de réponses au deuxième palier, qui présentaient des justifications, en me 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 complétion du questionnaire sur la plateforme Web avec un même échantillon d'étudiants, afin de comparer ces deux méthodes de diagnostic de conceptions et de valider que le questionnaire « Molécules, polarité et phénomènes » détecte 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 procéder au diagnostic des conceptions alternatives chez les étudiants de Sciences de la nature.

Une autre limite de la recherche concerne l'analyse des données brutes obtenues lors des phases préliminaire et pilote. J'ai effectivement procédé à des interprétations, des recoupements et des inférences que pouvait teinter ma propre compréhension de ce que voulaient dire les étudiants. Lors de la phase pilote, un collègue, enseignant de chimie, m'a aidée à faire cette interprétation; lors de la phase principale, un deuxième collègue m'a prêté main-forte pour associer les conceptions alternatives aux choix de réponses. Malgré toute notre bonne foi, nous n'étions pas à l'abri d'erreurs d'interprétation. De la phase pilote à la phase principale, pour assurer la fiabilité des items du questionnaire final, je me suis efforcée de rédiger le plus clairement possible les items du questionnaire. Certaines « conceptions » que j'ai détectées comme telles n'en sont probablement 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 diagnostiquées, c'est-à-dire de préciser si elles sont profondément ancrées ou si elles résultent d'une réponse spontanée basée sur de l'ignorance. Même si les résultats du test "Molécules, polarité et phénomènes", présentés dans ce rapport, ne révélaient 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.

Une troisième 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. J'avais consciemment pris cette précaution pour préserver la confidentialité des étudiants; reste qu'elle fait en sorte qu'une certaine forme d'analyse des données ne peut pas être réalisée. Il serait intéressant, dans 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, c'est-à-dire 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.

### 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.

Ensuite, il serait sûrement intéressant de mener les entrevues dont j'ai parlé 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 conceptions alternatives dans des catégories de mode de raisonnement, catégories émergentes dont le présent rapport 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.

## 8. Conclusion

Depuis les années 1970, de nombreuses équipes de recherche dans le monde ont étudié les conceptions alternatives, ces représentations personnelles des contenus scientifiques que construisent les étudiants et qui sont en désaccord avec la théorie admise. Ces conceptions alternatives ont un impact négatif sur l'apprentissage des étudiants, car elles structurent leurs connaissances antérieures en modèles inadéquats. Pour un enseignant, la première base sur laquelle appuyer un enseignement visant le changement conceptuel, soit la remédiation des conceptions alternatives, est de connaître les conceptions alternatives de ses étudiants.

Pourtant, on n'avait jusqu'à ce jour tracé aucun portrait des conceptions alternatives en chimie des étudiants collégiaux de Sciences de la nature québécois. Cette recherche visait à pallier ce manque et à fournir aux enseignants un portrait des conceptions alternatives les plus fréquentes autour des concepts de molécule, de polarité et de liaison chimique, et autour des phénomènes macroscopiques.

À l'aide d'un questionnaire à deux paliers à choix multiples sur plateforme Web, j'ai diagnostiqué de nombreuses conceptions alternatives chez les étudiants de cégep. J'ai comparé le score pondéré au test de différents groupes d'étudiants; il est intéressant de remarquer qu'il n'y a pas de différence significative entre le score des étudiants des cégeps publics et celui des étudiants de collèges privés, ni entre les étudiants de première année et ceux de deuxième année. Toutefois, j'ai noté une différence significative entre le score des garçons et celui des filles, à l'avantage des garçons; un résultat surprenant considérant que les garçons canadiens répondent généralement moins bien que les filles aux tests standardisés internationaux de classement en sciences, comme le PISA (OCDE, 2007).

En conclusion, les quelques lignes qui suivent tenteront de résumer très brièvement les résultats les plus saillants de la présente recherche. Les enseignants tiennent pour acquis que les étudiants ont une définition opérationnelle de ce qu'est une molécule. Mais cette étude tend à montrer que la représentation mentale de ces derniers est le plus souvent en désaccord avec le modèle scientifique et qu'elle s'adapte au contexte. Les étudiants ont tendance à croire que tout assemblage d'atomes forme nécessairement une molécule, ce qui n'est pas le cas. Dans le prolongement de cette conception très répandue chez les étudiants québécois, une autre, selon laquelle les molécules se brisent lors du changement de phase ou de la mise en solution, est très préoccupante. Cette conception peut avoir des impacts négatifs graves sur l'apprentissage de notions plus avancées en chimie, au collégial comme à l'université. Enfin, une dernière conception alternative particulièrement importante, tant par le nombre d'étudiants qui la partagent qu'à cause de l'impact qu'elle peut avoir sur

l'apprentissage, est en fait un véritable cadre conceptuel alternatif qui confond toutes les liaisons chimiques en une même définition mal comprise, mal appliquée et tenant mal en compte les circonstances. En sachant que les liaisons chimiques expliquent une grande partie du comportement de la matière, de même que l'état et la réactivité de celle-ci, la confusion des liaisons intermoléculaires et intramoléculaires devrait constituer une cible pour les enseignants de chimie, à corriger par une analyse didactique systématique des concepts mal compris, une illustration de chacun d'eux à l'aide d'exemples et de contre-exemples et la mise en relation explicite des différents niveaux de représentation des contenus en chimie.

La typologie des erreurs de raisonnement que je propose pourra être utilisée comme base pour proposer des dispositifs pour le changement conceptuel, sachant que certaines conceptions tirent leur source d'erreurs de raisonnement communes. Ce court inventaire d'erreurs de raisonnement n'est pas exclusif au domaine de la chimie, donc on pourrait aussi observer ces erreurs dans d'autres disciplines.

Ce portrait des conceptions alternatives des étudiants québécois de Sciences de la nature offrira, je l'espère, une base de réflexion qui saura inspirer les enseignants de chimie à stimuler chez leurs étudiants le changement conceptuel afin que ceux-ci acquièrent une solide compréhension de la matière, qui sera garante non seulement de leur succès scolaire, mais de leur efficacité comme travailleurs et de la pertinence de leur réflexion comme citoyens de ce monde où abondent les enjeux dans lesquels la chimie peut apporter un éclairage important.

## Références

- 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.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y., & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences*. (2<sup>e</sup> éd.). Bruxelles: de Boeck Université.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, R., & Papillon, L. (2009). *Chimie générale, 3e édition*. Montréal: Chenelière McGraw-Hill.
- 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.
- 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). *Les conceptions alternatives en chimie d'étudiants postsecondaires: identification par un questionnaire diagnostique à deux paliers*. Communication présentée au XVIIe Congrès de l'Association Mondiale des Sciences de l'Éducation, Reims, France.
- Cormier, C. (2013). *A novel typology for alternative conceptions in postsecondary chemistry identified by a two-tier diagnostic instrument*. Communication présentée au 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 au 2011 NARST Annual International Conference, Orlando, FL.
- 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 au 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.
- Feynman, R. P. (1963, éd. 1995). *Six easy pieces*. Cambridge, MA: Basic Books.
- Flamand, E., & Allard, J.-L. (2004). *Chimie générale*. (2<sup>e</sup> éd.). Mont-Royal: Modulo Éditeur.

- 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., Barcenas, 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.
- 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.
- Grayson, D. J., Anderson, T. R., & Crossley, L. G. (2001). A four-level framework for identifying and classifying student conceptual and reasoning difficulties. *International Journal of Science Education*, 23(6), 611-622.
- 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](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.
- 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* (89e édition, version internet<sup>e</sup> 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
- 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.
- IBM Corp. (2012) IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- IUPAC (1997). *Compendium of chemical terminology*. (2<sup>e</sup> 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.
- Karsenti, T., & Savoie-Zajc, L. (2004). *La recherche en éducation: étapes et approches*. Sherbrooke: Éditions sur CRP, Faculté d'éducation.
- Kotz, J. C., & Treichel, P. M. (2005). *Chimie générale*. Laval: Groupe Beauchemin.
- Krajcik, J. S. (1989). *Students' interactions with science software containing dynamic visuals*. Communication présenté The Annual Meeting of the American Anthropological Association, Washington, DC.
- 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.),

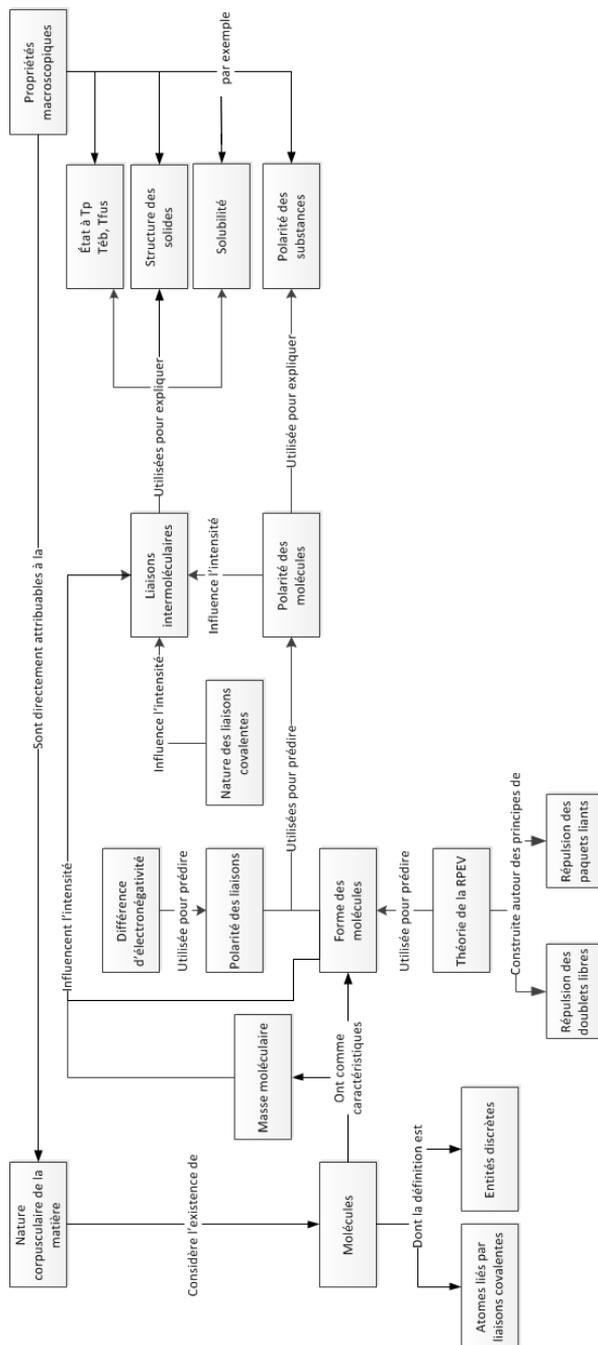
- Handbook of Research On Science Teaching and Learning*. New York, NY: Simon & Schuster Macmillan.
- Lee, O., Eichinger, D. C., Anderson, C. W., Berkheimer, G. D., & Blakeslee, T. D. (1993). Changing middle school students' conceptions of matter and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 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.
- 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. (2008). 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](http://www.mels.gouv.qc.ca/stat/Stat_det/coll_eff.htm)
- 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.
- 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.
- Pallrand, G., VanHarlingen, D., Lockwood, W., Martin, W., & Piburn, M. D. (1981, April). *Reasoning patterns of college science students*. Communication présenté Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Grossinger's, NY.
- 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<sup>e</sup> éd.). Kiel, Germany: University of Kiel.
- Piburn, M. D. (1990). Reasoning about logical propositions and success in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(9), 887-900.
- 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 13 juillet 2010 à <http://www.provalisresearch.com/QDAMiner/QDAMinerDesc.html>
- Reger, D. L., Goode, S. R., & Mercer, E. E. (2000). *Chimie générale*. Laval: Éditions Études Vivantes.
- Roadranga, 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).
- Schmidt, H.-J. (1996, April, 1996). *Students' understanding of molecular structure and properties of organic compounds*. Communication présenté Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, St. Louis (MO).
- 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. (1998). An alternative conceptual framework from chemistry education. *International Journal of Science Education*, 20(5), 597-608.
- 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.
- 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. (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. (1997). La construction des connaissances 1. Les consensus. *Pédagogie collégiale*, 11(2), 14-19.
- Torkia-Lagacé, M. (1981). La pensée formelle chez les étudiants de collège 1: objectif ou réalité? Québec, QC: Cégep de Limoilou.
- 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., & 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<sup>e</sup> 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 au 2013 NARST Annual International Conference, San Juan, Puerto Rico.
- Voisard, B., & Cormier, C. (2013). *Chimie organique*. Anjou, QC: Les éditions CEC.
- 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.
- 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 1 – Carte conceptuelle des notions visées par cette étude





## Annexe 2 – Questionnaire à choix multiples à deux paliers

### Présentation des items du questionnaire

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** Q01 Atome de soufre

**Énoncé de la question** 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 cet échantillon, si on parvenait à l'isoler?

**Pondération (sur 5)**

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
	<b>a</b> Toutes les propriétés seraient les mêmes.		940
<b>Choix a) au premier palier</b>	a1 Ces propriétés ne dépendent pas de la quantité de matière.	0	398
<b>Justifications (deuxième palier) pour le choix a)</b>	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>Choix b) au premier palier</b>	<b>b</b> Aucune propriété ne serait la même.		675
	b1 * Ce sont des propriétés physiques, mais seulement les propriétés chimiques seraient les mêmes.	5	331
<b>Justifications (deuxième palier) pour le choix b)</b>	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
<b>Choix c) au premier palier</b>	<b>c</b> 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
<b>Justifications (deuxième palier) pour le choix c)</b>	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 151.

### Q02 Laquelle est une molécule, formule

Voici les formules chimiques de composés :  $\text{NH}_4\text{Br}$  et  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . 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 $\text{NH}_4\text{Br}$ 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 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 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 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 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 151.

### Q03 Forme de la molécule d'eau

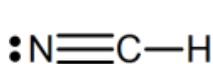
Qu'est-ce qui cause la molécule d'eau, H<sub>2</sub>O, à adopter la forme géométrique qu'elle adopte?

	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

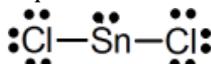
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page 151.

### Q04 Laquelle est linéaire

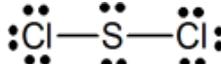
Parmi les molécules suivantes, laquelle a une structure linéaire?



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 <sub>2</sub>		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 <sub>2</sub>		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 151.

## Q05 La plus polaire, boules et bâtonnets

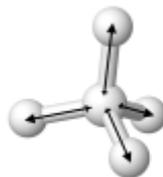
Laquelle de ces représentations montre une molécule polaire?



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 151.

## Q06 HCOOH en solution aqueuse

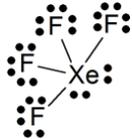
Qu'est-ce qui se produirait si on mélangeait ensemble de l'acide formique (HCOOH) et de l'eau? Notez que l'acide formique est un acide faible.

	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

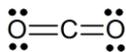
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page 151.

### Q07 La plus polaire, Lewis

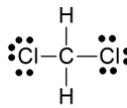
Étant donné les structures de Lewis des molécules suivantes, laquelle parmi celles-ci est la plus polaire?



a.



b.



c.

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	[XeF <sub>4</sub> ]		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 <sub>2</sub> ]		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 <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ]		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 151.

### Q08 Halogène solide

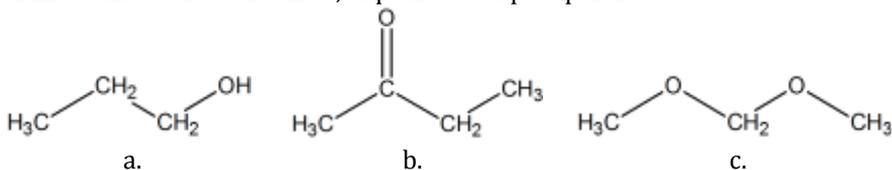
Parmi les halogènes suivants, lequel est solide à température de la pièce et à pression ambiante?

	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 <sub>2</sub> , 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 151.

### Q09 La plus polaire, carbonyle

Parmi les molécules suivantes, laquelle est la plus polaire?



Choix de réponse		Points	Nombre d'étudiants
<b>a</b>			416
a1	Le groupement OH est un groupement polaire.	3	216
a2	Cette molécule peut faire des liaisons hydrogène.	3	142
a3	L'atome d'oxygène est placé en bout de chaîne.	1	58
<b>b</b>			1012
b1	La liaison double est plus polaire que les liaisons simples.	2	378
b2	Les vecteurs de polarité ne s'annulent pas entre eux.	5	333
b3	La différence d'électronégativité est élevée.	0	301
<b>c</b>			555
c1 *	Cette molécule a le plus d'atomes très électronégatifs.	5	421
c2	Cette molécule est la plus longue.	0	37
c3	Cette molécule est symétrique.	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 « Conceptions alternatives sur la polarité », page 108. Voir explication des colonnes en page 151.

## 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 151.

### 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 <sub>2</sub>		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 <sub>4</sub>		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 151.

## Q12 Différence eau/glace

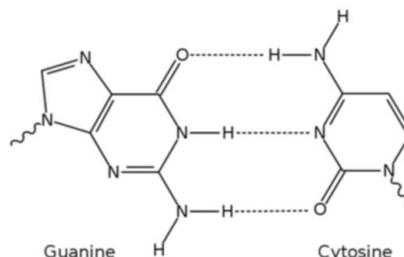
Parmi les différences suivantes, laquelle est la différence la plus importante entre de la glace et de l'eau liquide?

	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 151.

### 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 151.

### Q14 Température d'ébullition, éthanol/méthanol

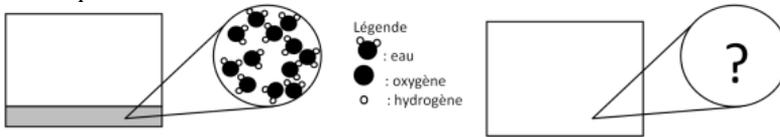
La température d'ébullition du méthanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) est de  $64,7\text{ }^\circ\text{C}$ . Celle de l'éthanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) est plus élevée, soit de  $78,5\text{ }^\circ\text{C}$ . Pourquoi y a-t-il une différence entre les deux, et pourquoi la température d'ébullition 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

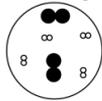
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page 151.

### Q15 Vue grossie après évaporation

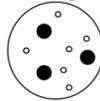
Le cercle dans la portion gauche montre une vue grossie d'une très petite portion d'eau liquide dans un contenant fermé.



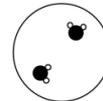
Qu'est-ce que la vue grossie montrerait après l'évaporation de l'eau?



a.



b.



c.

	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	[schéma avec molécules de H <sub>2</sub> et molécules d'O <sub>2</sub> ]		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 <sub>2</sub> O]		1310
c1	Lorsque l'eau s'évapore, la plus grande proportion des molécules de la phase vapeur sera des molécules de H <sub>2</sub> 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 151.

### Q16 Flocon de neige

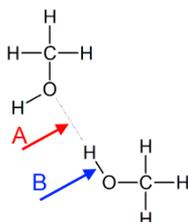
Les flocons de neige ont chacun une forme qui leur est unique. Pourtant, cette forme adopte une structure régulière, dont la géométrie est invariablement la même. Pourquoi les flocons de neige ont-ils cette géométrie particulière?

	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 151.

## Q17 Où est la liaison hydrogène

Sur le schéma suivant, quelle(s) flèche(s) indique(nt) la position d'une ou plusieurs liaisons hydrogène?

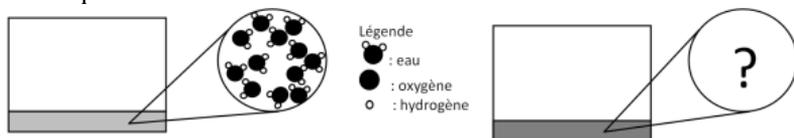


	Choix de réponse	Points	Nombre d'étudiants
a	La flèche rouge, identifiée A.		1205
a1	La liaison hydrogène est une liaison entre deux molécules qui ont des atomes d'hydrogène.	3	325
a2 *	L'atome d'hydrogène lié à un atome très électronégatif est attiré par l'atome d'oxygène d'une autre molécule.	5	692
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

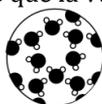
La bonne réponse est identifiée par un astérisque. Voir explication des colonnes en page 151.

## 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?



a.



b.



c.

	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 151.

### 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 <sub>2</sub> sont polaires.	1	517
a2	Le CO <sub>2</sub> est soluble dans l'eau puisqu'on le retrouve dans les boissons gazeuses.	1	103
a3	Le CO <sub>2</sub> est une petite molécule qui se faufile facilement dans les interstices entre les molécules d'eau	0	221
b	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub>		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 <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -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 151.

## Q20 Laquelle est une molécule, diagramme

Lequel ou lesquels des schémas suivants représente (nt) une ou plusieurs molécules?



Schéma 1

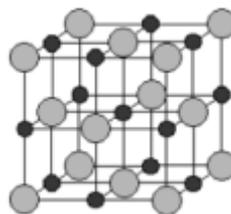


Schéma 2

	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 151.

## Annexe 3 – Inventaire de conceptions alternatives

<i>Item</i>	<i>Conception alternative</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Choix de réponse</i>	<i>N</i>	<i>%</i>
q01	Les atomes ont des propriétés macroscopiques pareilles à celles de l'élément qu'ils constituent.	ECT	a1, a2, a3, c1, c2, c3	1308	66,0 %
q01	Les atomes n'ont pas de propriétés chimiques communes avec la substance qu'ils constituent.	SE	b2	256	12,9 %
q01	Les atomes d'un même élément sont différents les uns des autres.	Erreur	b3	88	4,4 %
q02	Tout regroupement d'atomes est une molécule.	SE	a1, a2, a3	1564	78,9 %
q02	Les molécules sont des entités discrètes.	D-R	b1	28	1,4 %
q02	Une molécule est formée de non-métaux.	D-R	b2, c2	79	4,0 %
q02	Ce qui s'ionise dans l'eau ne peut pas être une molécule.	Erreur	b3	73	3,7 %
q02	La forme d'une molécule est causée par sa polarité.	Caus	c1	151	7,6 %
q02	Les molécules organiques peuvent ne pas contenir d'atome de carbone.	Erreur	c3	45	2,3 %
q03	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les doublets libres.	D-R	a1, b1	508	25,6 %
q03	La forme d'une molécule est causée par la répulsion entre les atomes périphériques.	D-R	a2, b2	417	21,0 %
q03	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.	D-R et plus	a3	327	16,5 %
q03	La forme d'une molécule est causée par les liaisons hydrogène qu'elle peut faire.	Caus	c1, c2, c3	544	27,4 %
q04	La forme d'une molécule est causée par la présence ou l'absence de doublets libres sur l'atome central.	D-R	a1	336	16,9 %
q04	La molécule est linéaire parce que la liaison triple est rigide.	Conn	a2	549	27,7 %
q04	Cadre alternatif de l'octet	Erreur	b1	12	0,6 %
q04	Une molécule a la forme de sa structure de Lewis.	SE	b2, c2	466	23,5 %
q04	Une molécule symétrique est linéaire.	SE	b3, c3	235	11,9 %
q05	Argument non-polaire pour polaire.	ArgOpp	a1, c3	246	12,4 %
q05	Erreur dans l'addition vectorielle.	Erreur	a2, c1	328	16,5 %
q05	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	D-R	a3, b3	112	5,6 %
q05	Erreur dans l'addition vectorielle. ET Argument non-polaire pour polaire.	ArgOpp	b1	30	1,5 %
q05	L'électronégativité des atomes détermine la forme d'une molécule.	Conn	c2	43	2,2 %
q06	La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à l'ionisation.	ImpFac	a1, b1, c1	1050	53,0 %
q06	La solubilité dans l'eau est surtout attribuable à la polarité.	ImpFac	a3	256	12,9 %
q06	Règle du pouce: les composés organiques sont peu solubles dans l'eau.	SE	b2, c2	84	4,2 %
q06	Erreur dans la prédiction de la polarité d'un composé (sans pouvoir identifier la raison).	Erreur	b3, c3	127	6,4 %
q07	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	D-R	a1, b1, c1	477	24,1 %
q07	Erreur dans la prédiction de la forme d'une molécule OU Erreur dans l'addition vectorielle.	Erreur	a2, b2	1169	59,0 %
q07	Argument non-polaire pour polaire.	ArgOpp	a3, b3, c3	189	9,5 %
q08	Méconnaissance d'éléments communs.	Erreur	a1, b1, b2, b3	432	21,8 %
q08	Les éléments ont les mêmes propriétés que les composés qu'ils forment.	ECT	a2, a3, c2	1011	51,0 %
q08	Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	ECT	c1	218	11,0 %

<i>Item</i>	<i>Conception alternative</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Choix de réponse</i>	<i>N</i>	<i>%</i>
q09	Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	SE	a1	216	10,9 %
q09	Une molécule est polaire parce qu'elle fait des liaisons hydrogène.	Caus	a2	142	7,2 %
q09	Erreur dans l'addition vectorielle.	Erreur	a3	58	2,9 %
q09	Une liaison double est plus polaire qu'une liaison simple.	D-R	b1	378	19,1 %
q09	Une molécule est polaire si ses liaisons sont polaires.	D-R	b3	301	15,2 %
q09	Une molécule est polaire si elle fait des liaisons intermoléculaires fortes. OU Argument non-polaire pour polaire.	Erreur	c2	37	1,9 %
q09	Argument non-polaire pour polaire.	ArgOpp	c3	97	4,9 %
q10	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.	D-R	a1	287	14,5 %
q10	Des liaisons covalentes existent entre les particules de solvant et de soluté d'une solution.	Erreur	a2	92	4,6 %
q10	Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	PromC	a3, c1	383	19,3 %
q10	Il n'y a pas de liaisons intermoléculaires entre les molécules dans une solution.	Ccomp	b1, b2	244	12,3 %
q10	Aucune liaison intermoléculaire n'est formée ni brisée lors de la mise en solution.	SE	b3	472	23,8 %
q10	La mise en solution de composés moléculaires résulte en la réorganisation du solvant et du soluté en de nouveaux composés.	PromC	c2	247	12,5 %
q11	Erreur dans la prédiction de la forme d'une molécule (sans pouvoir identifier la raison).	Erreur	a1	44	2,2 %
q11	Erreur dans la prédiction de la polarité d'une molécule (sans pouvoir identifier la raison).	Erreur	a2, c2	433	21,8 %
q11	Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	D-R	a3	137	6,9 %
q11	Les liaisons intermoléculaires sont les liaisons à l'intérieur des molécules.	SE	b1, c3	979	49,4 %
q11	L'intensité des liaisons intermoléculaires est seulement causée par la taille des molécules.	D-R	b2, c1	207	10,4 %
q12	Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	ECT	a1, a2, a3	229	11,5 %
q12	Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	SE	b1, b2, b3	843	42,5 %
q12	Les particules d'un solide sont immobiles.	Erreur	c2	108	5,4 %
q12	L'intensité des liaisons intermoléculaires (et non l'énergie cinétique des molécules) explique l'état de la matière.	Comm	c3	70	3,5 %
q13	Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	SE	a1, a2	450	22,7 %
q13	Toute liaison entre deux atomes non métalliques est covalente.	SE	a3	106	5,3 %
q13	Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	SE	b2, c3	193	9,7 %
q13	Des liaisons intermoléculaires ont comme seule caractéristique d'être dessinées avec des pointillés.	Erreur	b3	53	2,7 %
q13	Une liaison ne peut pas être représentée par des pointillés.	Erreur	c1	49	2,5 %
q13	Une liaison hydrogène n'est pas une liaison, mais plutôt une force.	SE	c2	139	7,0 %

Item	Conception alternative	Catégorie	Choix de réponse	N	%
q14	Erreur dans l'identification des molécules faisant des liaisons hydrogène (certaines en font, mais l'étudiant dit qu'elles n'en font pas).	Erreur	a1, a2, a3	390	19,7 %
q14	L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	PromC	b1, c1, c2, c3	1221	61,6 %
q14	Une masse moléculaire élevée rend l'évaporation difficile parce que les molécules sont lourdes.	ECT	b3	110	5,5 %
q15	L'évaporation d'un composé entraîne le bris des liaisons covalentes de ses molécules.	PromC	a1, b1, b2, b3, c1	848	42,8 %
q15	Les gaz produits par l'évaporation sont les gaz qui étaient dissous.	Erreur	a2	60	3,0 %
q15	L'évaporation entraîne une disparition de la matière.	Erreur	a3, c2	413	20,8 %
q16	Explication téléologique.	Erreur	a2	310	15,6 %
q16	Les molécules ont les mêmes propriétés que la substance qu'elles constituent.	ECT	a3, b3, c3	218	11,0 %
q16	La structure de l'eau solide est surtout attribuable à des liaisons dipôle-dipôle.	ImpFac	b1, c1	556	28,0 %
q16	La forme d'une molécule est causée par sa polarité.	Caus	b2, c2	276	13,9 %
q17	Une molécule peut faire des liaisons hydrogène si elle a des atomes d'hydrogène.	D-R	a1	325	16,4 %
q17	Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	SE	a3	188	9,5 %
q17	Les liaisons hydrogène sont des liaisons covalentes.	SE	b1, b2, b3, c1, c2, c3	778	39,2 %
q18	L'intensité des liaisons intermoléculaires (et non l'énergie cinétique des molécules) explique l'état de la matière.	Comm	a1, b1	178	9,0 %
q18	Les liaisons hydrogène sont des liaisons dipôle-dipôle.	SE	a3, b2	221	11,1 %
q18	Les solides ont tous une organisation moléculaire plus compacte que les liquides.	SE	b3, c2	1289	65,0 %
q18	Les liaisons hydrogène se forment seulement dans les solides.	SE	c3	40	2,0 %
q19	Erreur dans la prédiction de la polarité d'un composé (sans pouvoir identifier la raison).	Erreur	a1	517	26,1 %
q19	Un composé en solution dans l'eau est nécessairement très soluble dans l'eau.	SE	a2	103	5,2 %
q19	La mise en solution est la répartition des particules de soluté dans les interstices du solvant.	Ccomp	a3	221	11,1 %
q19	Les liaisons covalentes se brisent lors de la mise en solution.	PromC	b1	212	10,7 %
q19	La formation de ponts H avec l'eau assure qu'un composé y est très soluble.	ImpFac	b2, c2	541	27,3 %
q19	Une molécule est polaire sitôt qu'elle porte un groupement polaire.	SE	b3	142	7,2 %
q19	Les composés moléculaires s'ionisent toujours dans l'eau.	PromC	c1	63	3,2 %
q20	Une molécule est formée de non-métaux.	D-R	a1	69	3,5 %
q20	Une molécule est formée d'atomes liés par des liaisons covalentes.	D-R	a2	290	14,6 %
q20	Les liaisons chimiques sont nécessairement représentées par des bâtonnets.	Erreur	b1	200	10,1 %
q20	Restriction au niveau de la représentation d'une molécule.	Erreur	b2	34	1,7 %
q20	Argument ionique pour moléculaire.	ArgOpp	b3	66	3,3 %
q20	Tout regroupement d'atomes est une molécule.	SE	c1, c2, c3	1001	50,5 %

## Annexe 4 – Typologie des erreurs de raisonnement

Ce tableau est détaillé à la section « Typologie des erreurs de raisonnement », à partir de la page 83.

<b>Erreur de raisonnement</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
Demi-raisonnement	D-R	Utilisation d'une partie seulement des critères essentiels à une prédiction correcte.
Simplification excessive	SE	Omission de considérer des facteurs importants.
Importance des facteurs	ImpFac	Attribution d'une importance relative incorrecte aux facteurs permettant la prédiction de phénomène.
Argument opposé	ArgOpp	Raisonnement qui pointe vers l'exact opposé de la réponse donnée.
Explication corpusculaire tautologique	ECT	Transposition des propriétés macroscopiques aux particules sous-microscopiques.
Physique vu comme chimique	PcomC	Description d'un changement physique comme s'il s'agissait d'une réaction chimique.
Causalité inverse	Caus	Invocation de la conséquence pour expliquer la cause.
Connexion	Conn	Utilisation d'une notion non reliée à un concept pour expliquer celui-ci.